



Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes



**Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'Agronomie
Spécialisation Traitement de l'Information Spatiale**

**IDENTIFICATION DE BIOTOPES LAGONAIRES
PAR
IMAGERIE LANDSAT 7 ET COUPLAGE SIG**

- Guénolé BOUVET -

Maître de stage : Jocelyne FERRARIS

avril – septembre 2000

AVANT-PROPOS

Je tiens à remercier particulièrement Jocelyne FERRARIS qui m'a permis de travailler dans le laboratoire d'océanographie de l'IRD de Nouméa, au sein du programme ECOTROPE et de son équipe de chercheurs et techniciens que j'ai eu l'occasion de connaître et apprécier. Merci à Renaud FICHEZ, responsable du programme.

Mes remerciements s'adressent également à Richard FARMAN, adjoint au Directeur de la Direction des Ressources Naturelles de la Province Sud de Nouvelle-Calédonie pour nous avoir informés (J. FERRARIS et moi-même) au sujet du Landsat7 Long Term Acquisition Plan pour la couverture spatiale des récifs coralliens et du projet de surveillance de ces récifs. Je le remercie également pour m'avoir permis d'utiliser les photographies aériennes collectées dans le cadre du suivi des réserves marines du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie.

J'adresse un grand merci à Bernard LORTIC, Elisabeth HABERT et Marc SOURIS de l'IRD de Bondy pour les conseils et le soutien technique qu'ils m'ont apportés dans l'utilisation du logiciel de Système d'Information Géographique : SAVANE. Je tiens à remercier également Jérôme BOURDERIE, étudiant à Intechmer, avec qui j'ai travaillé en collaboration pendant toute la durée de mon stage.

Merci à Didier LILLE pour avoir mis à ma disposition les moyens informatiques du LATICAL. Merci à Nicolas DITCHY qui m'a aidé à traiter mes images Landsat7 et à Serge ANDREFOUËT, du département de sciences marines de the University of South Florida, qui m'a conseillé, à distance, dans l'utilisation de ces images et qui m'a procuré de nombreuses publications.

Merci aussi à l'ensemble des stagiaires, thésards et Volontaires à l'Aide Technique de l'IRD sans qui mon séjour en Nouvelle-Calédonie n'aurait pas été aussi sympathique. Bravo à la Subaru de Gaël qui a fièrement passé le cap des 300 000 km ! Special dedicace à Esther et Nico, mes deux colloc'. Si pas de Fabien, pas de vérité terrain, pas de dugong ! Bon vent à toi, Marie-thérèse ...

Merci à mes amis Kanak : Freddy de la tribu de Ny à Bourail, Labert de la tribu de Tadine et Alan de la tribu de Ceingeité sur Maré, et à leurs familles pour leur hospitalité simple et vraie, pour les comtes et les légendes qu'ils m'ont racontés et chantés, pour m'avoir fait découvrir une petite partie de la culture mélanésienne.



SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

INTRODUCTION

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ANNEXES

1.	CONTEXTES GEOGRAPHIQUE ET SCIENTIFIQUE.....	5
1.1.	La Nouvelle-Calédonie et le Lagon sud-ouest.....	5
1.2.	L'IRD : Institut de Recherche pour le Développement.....	5
12.1.	Le centre IRD de Nouméa.....	5
1.3.	Le programme ECOTROPE.....	6
13.1.	Objectifs	6
13.2.	Lieux d'étude	7
1.4.	La conception d'un SIG et l'utilisation d'image de télédétection.....	7
1.5.	objectifs de stage	8
2.	Matériel et méthodes	10
2.1.	Le SIG et l'intégration des données ecotrope	10
21.1.	Le logiciel SAVANE.....	10
21.2.	Principales fonctionnalités.....	10
21.3.	Les données scientifiques intégrées dans le SIG.....	10
21.4.	La nomenclature des fichiers de la base et des relations	12
21.5.	Le dictionnaire de la base	12
2.2.	Les images de télédétection.....	13
22.1.	Les images satellites.....	13
22.2.	Les images aériennes	17
22.3.	Préparation, intégration et classification des images dans le SIG	17
3.	Resultats	21
3.1.	Construction d'un modele de classification sur une zone lagonaire : l'Ilot Maître.....	21
31.1.	Description du milieu	21
	Résultats de la classification.....	21
31.3.	Qualité du modèle.....	26
4.	DISCUSSION.....	33
4.1.	Intérêts de la méthode.....	33
41.1.	Une exploration des données qui facilite l'interprétation des classes.....	33
41.2.	Indépendance des classes par rapport à la zone classifiée	33
41.3.	Un outil pour la quantification des ressources lagonaire.....	34
41.4.	Un outil de suivi des biotopes moyennant amélioration du modèle.....	34
4.2.	Limites	34
42.1.	Confusion entre différents biotopes et nécessité de la connaissance experte	34
42.2.	Une méthode peu adaptée au grande profondeur	35
42.3.	Le recoupement possibles des règles de décision	35
5.	Conclusion.....	36

REFERENCES

ANNEXES

RESUME

ABSTRACT

INTRODUCTION

"Interpretive skill increases if the interpreter is familiar with the subject conditions in the field."

D. Kuchler, 1987. [KUC87]

Situé dans le Pacifique sud-ouest, à l'intérieur de la zone intertropicale, le lagon de Nouvelle-Calédonie et sa longue barrière de corail représente un écosystème d'une rare diversité. Cependant, c'est un espace fragile et menacé. Il est aujourd'hui en partie protégé grâce à la mise en place de réserves marines où la pêche est interdite. L'IRD (Institut de la Recherche pour le Développement) s'intéresse depuis plus de 15 ans aux structures et au fonctionnement de cet écosystème.

Les données scientifiques sur le lagon sont aujourd'hui nombreuses et il devient nécessaire de les ordonner et de les synthétiser. Le Système d'Information Géographique (SIG) permet cette organisation et la confrontation des différentes données. L'IRD possède un logiciel interne de SIG : SAVANE. C'est le logiciel qui a été utilisé pour intégrer les données du programme environnemental ECOTROPE (Ecosystèmes CÔtiers TROPicaux du Pacifique sous influences terrigènes et anthropiques) et des programmes qui l'ont précédé dans l'étude du lagon.

La télédétection est utilisée sur les lagons et sur les zones d'eau peu profondes. De nombreux travaux ont été réalisés dans ce domaine : étude des transports de sédiments à l'embouchure de rivières [PFO98], dans les zones côtières [OUI98a][OUI98b], étude des zones d'herbiers [MUM97b]. En Nouvelle-Calédonie plusieurs scènes issues du satellite SPOT ont été utilisées afin d'étudier l'habitat de *Trochus niloticus* sur le récif de Tetembia [WBO86], afin d'établir des cartes thématiques des platiers récifaux [WBO94] et d'étudier l'évolution de zone de croissance de récif corallien [WBO96]. Ces travaux n'utilisent pas l'imagerie Landsat7. Celle-ci est en effet récente : le satellite Landsat7 ETM+ a été lancé en avril 1999. Les informations fournies par Landsat7 sont potentiellement intéressantes : 1- une scène Landsat7 couvre une grande superficie (180 km par 180 km) 2- la résolution spectrale est importante (3 bandes spectrales dans le domaine visible, une bande dans le proche infra-rouge, deux dans l'infra-rouge, deux dans l'infra-rouge thermique et une panchromatique) 3- la résolution spatiale est de 30 mètres 4- la résolution temporelle est potentiellement de 16 jours.

Mon travail s'inscrit dans le cadre du projet de surveillance des récifs coralliens par imagerie Landsat7. Il se décompose en deux parties : dans un premier temps, la participation à la mise en place du SIG ECOTROPE. Elle a été amorcée en 1997 par FERRARIS, VIRLY puis RENAUD. Une première réflexion conceptuelle avait été réalisée par DELEPLANCQUE en 1997. Un stage réalisé en 1999 à l'IRD de Nouméa m'a permis de me familiariser avec les enjeux du programme ECOTROPE et, par la création d'un réseau interne d'informations, de connaître l'ensemble des personnes concernées par la création du SIG [BOU99]. Dans un deuxième temps, j'ai mis en place les protocoles d'intégration d'images Landsat7 dans le SIG, puis construit avec J. FERRARIS un modèle de classification des biotopes lagunaires et enfin défini la méthode d'application de ce modèle par le SIG SAVANE. La qualité du modèle et des informations fournies par Landsat7 sur la zone lagunaire de Nouméa ont alors été évaluées par confrontation aux données intégrées dans le SIG.

1. CONTEXTES GEOGRAPHIQUE ET SCIENTIFIQUE

1.1. LA NOUVELLE-CALÉDONIE ET LE LAGON SUD-OUEST

Le Territoire de Nouvelle-Calédonie est compris entre les longitudes 161°E – 167°E et les latitudes 18°S-23°S si l'on exclut les plateaux coralliens éloignés des Chesterfield et de Bellona à l'Ouest et deux îlots volcaniques, Matthew et Hunter, à l'Est (cf. figure 1.1). L'île principale, appelée Grande Terre, mesure 400 km de long et a une largeur de 50 km. Les autres îles entourant la Grande Terre sont Belep, les Loyautés et L'île des Pins.

La Grande Terre est formée d'une chaîne centrale de montagnes, avec de larges plaines côtières à l'Ouest et une côte plus abruptes à l'Est.

La population du Territoire est voisine des 200 000 habitants (dont la moitié habitent Nouméa). Elle est pluriéthnique : Mélanésiens, Descendants d'Européens et Métropolitains, Polynésiens, Asiatiques vivent sur le Territoire.

Une longue barrière corallienne d'environ 1600 km de long entoure la Grande Terre, l'île des Pins et Belep. Elle délimite un vaste lagon de 23 000 km². Entre les côtes de la Grande Terre et le récif barrière, les milieux de lagon abritent des biotopes très différents : herbiers de phanérogames marines, champs d'algues, plaines de sable, dalles nues, récifs coralliens et îlots (LABOUTE *et al.*, 1991). Deux zones sont particulièrement représentatives des biotopes des milieux de lagon : les environs de Nouméa, où l'influence de la côte est nette, et le lagon sud, dépourvu d'apports terrigènes (LABOUTE *et al.*, 1991).

1.2. L'IRD : INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT

L'IRD (anciennement ORSTOM) est un établissement public à caractère scientifique et technologique (E.P.S.T.), sous la tutelle conjointe du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et du Ministère de la Coopération. Il a pour mission spécifique la recherche en coopération pour le développement. Depuis plus de cinquante ans, il conduit des recherches sur les milieux intertropicaux. Ses personnels ont vocation à être affectés dans les différents pays et territoires de la zone intertropicale. Ainsi l'IRD mène des activités de recherche dans certains pays d'Afrique, d'Amérique Latine et d'Asie, ainsi que dans les Départements et Territoires d'Outre-Mer.

Organisme de recherche en coopération, l'IRD a pour tâche de travailler en partenariat avec les institutions des pays dans lesquels il intervient. Son action vise essentiellement la connaissance et la mise en valeur des milieux physiques, biologiques et humains caractéristiques de ces régions.

1.2.1. Le centre IRD de Nouméa

Le centre de Nouméa a été créé le 2 août 1946 sous l'appellation d'Institut Français d'Océanie (IFO) pour devenir centre ORSTOM en 1964 et centre IRD fin 1998.

S'il est pratiquement impossible de résumer plus de cinquante années de travaux scientifiques pluridisciplinaires, 3 grands domaines ont fait l'objet de recherches : le milieu marin, le milieu terrestre et les sociétés. Beaucoup de ces travaux ont été réalisés dans le cadre de grands programmes internationaux.

Des résultats scientifiques significatifs ont été obtenus grâce à des moyens logistiques et technologiques importants (informatique, navires spécialisés, biotechnologie, télédétection). Quelles soient fondamentales ou finalisées, les études effectuées ont conduit à des inventaires, collections, cartes, ouvrages, banques de données, brevets, contribuant à une meilleure connaissance et au développement de la Nouvelle-Calédonie et de la région Pacifique sud-ouest.

Deux pôles de recherche constituent les points forts de la recherche actuelle en Nouvelle-Calédonie :

- milieux - environnement et,
- ressources vivantes.

Les travaux portent sur la variabilité climatique associée au phénomène El Niño dans le Pacifique tropical. Les écosystèmes marins et littoraux sont étudiés à plusieurs niveaux : rôle de la biologie et effet de l'environnement sur les ressources exploitables hauturières et littorales. Les activités en géosciences concernent les ressources minérales, les risques naturels et la paléoclimatologie.

Dans le domaine des milieux terrestres, la Nouvelle-Calédonie présente un caractère exceptionnel par la variété de ses sols, la ressource en eau et la biodiversité (très forte endémicité de la faune et de la flore). Les études de botanique (écologie de la flore néocalédonienne), d'agropédologie (évolution des terres cultivées), de phytopathologie et d'entomologie (maladies des plantes et invasions biologiques), microbiologie (symbiose plantes - microorganismes) se poursuivent.

Le programme Substances Naturelles d'Intérêt Biologique a pour objectifs de découvrir les substances actives d'organismes issus de la biodiversité locale et régionale des domaines marins et terrestres. La valorisation de ces travaux est assurée par l'intermédiaire d'un groupement d'intérêt scientifique.

1.3.LE PROGRAMME ECOTROPE

Le développement économique des pays de la zone inter-tropicale induit des modifications majeures de l'environnement côtier. Les états insulaires du Pacifique, qui disposent de ressources et d'espaces limités, sont très sensibles aux conflits d'utilisation qui opposent souvent développement et environnement. Le programme ECOTROPE (Ecosystèmes CÔtiers TROPicaux du Pacifique sous influences terrigènes et anthropiques) s'appuie sur 20 années d'expérience de l'IRD dans le domaine de l'océanographie tropicale pour étudier l'effet des apports terrigènes et anthropiques sur les écosystèmes de lagons. L'effort de recherche à l'échelle de la région Pacifique est renforcé par une collaboration entre l'IRD et the University of the South Pacific basée à Fidji.

Le programme ECOTROPE a pour principal objectif de déterminer comment l'homme influence les écosystèmes littoraux du Pacifique. Son effort de recherche entre 1996 et 2000 est principalement axé sur les questions scientifiques suivantes :

- Quelle est l'origine et l'importance des principaux agents d'influences arrivant sur le lagon ?
- Comment ces apports sont-ils transportés dans le lagon et comment évoluent-ils ?
- Comment la qualité du milieu non vivant (eau, sédiments) est-elle modifiée par ces agents d'influences ?
- Comment le milieu vivant (poissons, faune du fond, etc.) est-il modifié par l'évolution de la qualité du milieu ?

13..1. Objectifs

L'une des principales finalités de ce programme est de fournir des outils d'aide à la décision pour le développement économique de la zone côtière. En effet, les altérations du milieu liées aux activités humaines ont d'importantes incidences financières. La gestion des ressources côtières qui doit prendre en compte une dégradation croissante de l'environnement repose sur des outils de diagnostic et de prédiction fiables.

Le programme ECOTROPE cherche à définir les bases scientifiques de ces outils et à développer des approches qui permettront d'obtenir une vision synthétique de l'état et de l'évolution de l'écosystème côtier :

- modélisation hydrodynamique
- transport de sédiments
- fonctionnement biologique
- Système d'Information Géographique

Les actions de recherche sont réparties en cinq grands thèmes :

Eaux :

- Modélisation de la circulation et du transport des éléments dissous et en suspension
- Caractéristiques physico-chimiques des eaux
- Mesure automatisée des variations à court terme des conditions de milieu

Sédiments :

- Répartition spatiale des caractéristiques sédimentologiques et géochimiques du sédiment
- Utilisation des sédiments pour retracer l'évolution de l'environnement durant le dernier siècle

Faune et flore vivant dans l'eau (pélagos) :

- Abondance, biomasse et production des bactéries marines
- Biomasse production et composition spécifique du plancton végétal

Faune et flore vivant sur le fond (benthos) :

- Cartographie des peuplements et des habitats
- Structure et diversité des peuplements
- Métabolisme
- Bioaccumulation des métaux dans les organismes

Peuplements de poissons :

- Analyse des données bibliographiques
- Evolution du recrutement dans les zones d'herbier et dans les algueraies
- Etude des petits poissons sédentaires comme indicateurs de l'évolution du milieu
- Bioaccumulation des métaux dans les poissons

13..2. Lieux d'étude

Le programme de recherche est appliqué sur 2 sites soumis à des influences urbaines et agricoles :

- le lagon de Nouméa
- le lagon de Suva (Fidji)

Hors de ces sites, le programme intervient plus ponctuellement en réponse à des sollicitations précises.

1.4.LA CONCEPTION D'UN SIG ET L'UTILISATION D'IMAGE DE TELEDETECTION

Le Système d'Information Géographique représente avant tout un outil pour la recherche. C'est un besoin pour le programme ECOTROPE, programme pluridisciplinaire : l'approche multivariée rendue possible par le SIG permet la confrontation des résultats des différents chercheurs et la représentation spatiale des résultats des travaux scientifiques effectués sur le lagon. Le SIG est également un outil de communication et de diffusion des résultats de la recherche. La base de données associée au SIG permet de plus un archivage des données scientifiques en un seul lieu.

Le SIG est aussi un outil d'aide à la décision. C'est un moyen de communication destiné :

- aux professionnels : 1- Le secteur minier est très actif en Nouvelle-Calédonie. On estime que les ressources en nickel dans le sous-sol calédonien représentent 20% des stocks exploitables dans le monde. Les rejets de particules dans l'atmosphère et dans les cours d'eau sont potentiellement modélisables et intégrables dans le SIG. 2- Les rendements de l'aquaculture sont très sensibles aux apports terrigènes et anthropiques. L'implantation d'une ferme aquacole ne se fait pas aux hasard et le SIG peut être un outil efficace pour choisir le lieu d'implantation le mieux adapté à la ferme. 3- Afin de maintenir la ressource, l'effort de pêche ne peut pas être le même sur tout le lagon. Le SIG peut aider à la détermination de zones fragiles, où la pêche doit être contrôlée.
- aux décideurs et aux gestionnaires : la gestion des eaux usées, l'implantation de nouvelles zones industrielles sont des domaines où le SIG peut être très utile.
- aux plaisanciers et aux touristes.
- à l'enseignement.

Les images de télédétection ont déjà été utilisées sur le récif calédonien (travaux de W. BOUR, imagerie SPOT) mais jamais à l'échelle du lagon. Les données du programme ECOTROPE intégrées dans le SIG représentent un bon moyen d'étudier la pertinence de telles images. L'outil SIG permet la confrontation des données récoltées sur le terrain pendant les 15 dernières années avec les informations des images de télédétection.

Le choix s'est porté sur une image Landsat7 plutôt que sur une image SPOT4 pour les raisons suivantes :

- Landsat7 est un satellite récent qui n'a jamais été utilisé en télédétection sur le lagon de Nouvelle-Calédonie,
- dans le cadre de l'augmentation de la couverture spatiale des récifs coralliens mondiaux par le satellite Landsat7 (Long-Term Acquisition Plan), il est intéressant de mettre au point des méthodes d'utilisation des images issues de ce satellite.
- la surface couverte par un cliché Landsat7 est large : 180 km² (contre 60 à 80 km² pour SPOT4),
- les bandes spectrales de Landsat7 sont *a priori* mieux adaptées à l'étude en milieu marin que celles de SPOT4 (cf. tab. 1.1). SPOT4 ne possède pas de bande spectrale dans le bleu,

localisation dans le spectre	SPOT4	LANDSAT7
bleu	-	0.45 – 0.52
vert	0.50 – 0.59	0.52 – 0.60
rouge	0.61 – 0.68	0.63 – 0.69
PIR	0.79 – 0.89	0.76 – 0.90
MIR	1.58 – 1.75	1.55 à 1.75
IR thermique	-	10.4 – 12.25

tab. 1.1 – Comparaison des bandes spectrales des satellites SPOT4 et Landsat7

- le prix d'une image Landsat7 est de 600 euros contre 1200 à 5100 pour une image SPOT [www2].

La résolution spatiale de Landsat7 est de 30 mètres (10 ou 20 pour SPOT4), ce qui est suffisant pour l'étude des biotopes lagunaires.

1.5.OBJECTIFS DE STAGE

Les objectifs sont les suivants :

- 1- structurer la base de données géographiques du programme ECOTROPE, créer une nomenclature des couches géographiques intégrées dans le SIG, mettre en place un dictionnaire des données de la base,
- 2- Mettre au point des méthodes d'utilisation de l'imagerie Landsat7, depuis l'achat de l'image jusqu'à son intégration et sa classification dans le SIG,
- 3- construire un modèle de classification adapté à la zone lagunaire en vue de l'identification de biotopes d'intérêt scientifique et économique,
- 4- utiliser les potentialités du SIG SAVANE et les données intégrées dans la base pour tester la pertinence du modèle et des images Landsat7 pour la classification de biotope sur la zone lagunaire de Nouméa.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. LE SIG ET L'INTEGRATION DES DONNEES ECOTROPE

L'intégration des données dans la base de données géographique ECOTROPE a été effectué en collaboration avec Jérôme Bourderie¹. C'est également ensemble que nous en avons étudiés la structure, la nomenclature des fichiers et le dictionnaire des données. SAVANE² est le logiciel de SIG qui a été utilisé.

21..1. Le logiciel SAVANE

SAVANE est un système d'information géographique développé par l'IRD pour répondre aux besoins spécifiques des équipes de chercheurs de l'institut et capitaliser l'expérience acquise dans les domaines urbains et environnementaux. Le logiciel a été conçu pour saisir, traiter et analyser des données géographiques d'origines diverses, organisées suivant le modèle relationnel étendu à la localisation : l'ensemble de l'information est géré en une base de données unique qui intègre l'imagerie.

Le SIG SAVANE est composé du logiciel principal SAVANE et de trois modules destinés à construire et à modifier les bases de données :

- SAVEDIT : le module de digitalisation et de modification sur écran,
- SAVATECA : le module de création et d'administration des bases,
- SAVAMER : le module de redressement et d'intégration d'images.

21..2. Principales fonctionnalités

Les traitements de données sont orientés vers l'analyse spatiale : sélections, croisements, mises en relation, regroupements, masques, jointures et agrégation de données géographiques, requêtes et calculs sur les attributs, calculs (statistiques, métriques, morphologiques), classifications, interpolations graphiques et modèles numériques, télédétection géoréférencée et traitement d'image.

L'éditeur graphique intégré dans SAVANE permet de visualiser les résultats des requêtes sous forme de cartes, de dessin automatique et d'exportation postscript.

Les données de type image (images satellite, photographies aériennes, etc.) sont intégrées dans la base de données relationnelles comme les autres types d'objets localisés (zones, lignes, points). Des outils spécifiques de traitement d'image, issus du logiciel PLANÈTE³, permettent de modifier les images dans Savane.

21..3. Les données scientifiques intégrées dans le SIG.

Les données scientifiques disponibles concernent le lagon sud-ouest de Nouméa. Elles sont issues du programme ECOTROPE et des programmes précédents. Leur intégration se fait en deux étapes. 1- L'intégration des objets géographiques. 2- l'intégration des valeurs associées à ces objets.

¹ J. Bourderie est étudiant en dernière année à l'école Intechmer de Cherbourg. Il prépare son Diplôme de Technicien Supérieur de la Mer (DTSM) spécialisé en génie océanique et prospection

² Le SIG SAVANE a été conçu et est développé par Marc SOURIS, chercheur à l'IRD de Bondy. Ce logiciel destiné à des plateformes SUN est désormais disponibles pour les chercheurs de l'IRD sur windows 95, 98, 2000 et NT. Il est produit par SB2informatique.

³ PLANÈTE est un logiciel de télédétection développé par l'ORSTOM.

Les objets géographiques sont de plusieurs types :

- point : ce sont les stations d'échantillonnage ou d'observation dont la localisation est déterminée par GPS pour les données récentes, au compas ou au radar pour les anciennes.
- ligne : le trait de côte extrait des cartes digitalisée par le SHOM est de ce type.
- polygone : c'est le cas du récif barrière.

(Les positions sont rapportées au réseau géodésique IGN 1972. L'ellipsoïde de référence est l'International 1924.)

Les valeurs associées aux objets géographiques sont issues des campagnes lagonaires. Dans SAVANE, ces valeurs sont appelées attributs.

D'un point de vue pratique, les données sont intégrées en deux fichiers : un fichier de localisation (clé, latitude, longitude) mis en relation avec le fichier de valeurs correspondant (clé, attribut 1, attribut 2, etc.). La mise au format du fichier de localisations se fait avec le module SAVEDIT. L'intégration des localisations et des valeurs associées en couche géographique se fait grâce au module SAVATECA. Dans SAVANE, une couche géographique est appelée "relation". Le principe de l'intégration est résumé dans la figure 2.1.

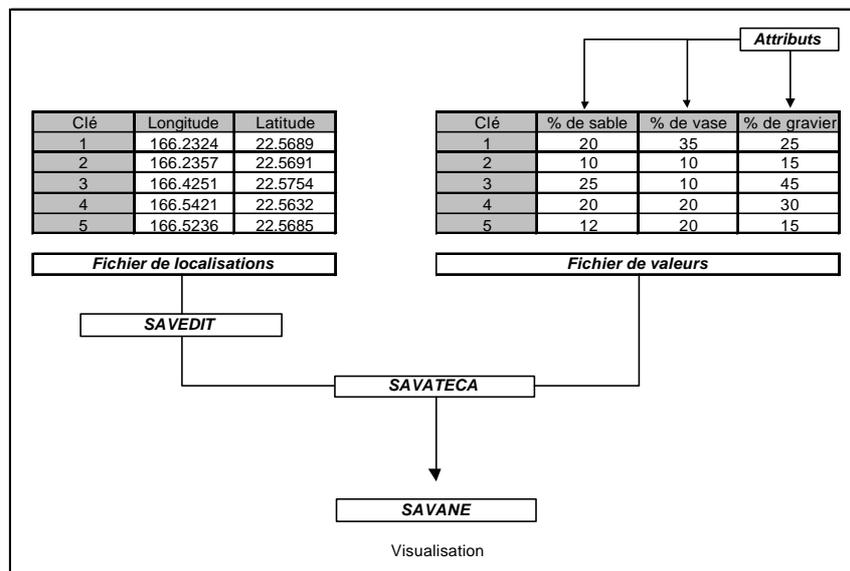


fig. 2.1 – Principe de l'intégration de données dans SAVANE

En revanche, l'intégration d'image se fait avec le module SAVAMER après géoréférencement dans ce même module.

A ce jour, ont été intégrées les relations suivantes :

- le trait de côte du sud-ouest calédonien
- le contour de la barrière de corail
- le contour des îlots
- le contour des platiers⁴
- les relevés bathymétriques
- flores benthiques
- métabolisme d'organismes benthiques
- données de campagnes palangrières

⁴ Un platier est une zone lagonaire de faible profondeur, plane, formée d'une dalle corallienne sur laquelle on trouve des coraux, des algues, des phanérogames, etc.

- sédimentologie en Baie de Sainte-Marie
- sédimentologie, faune et flore sur le récif Aboré
- sédimentologie lagonaire

21..4. *La nomenclature des fichiers de la base et des relations*

Les fichiers sont rangés dans la base en dossiers et sous-dossiers dont l'arborescence (simplifiée) est la suivante. Les termes de trois lettres en italique sont ceux utilisés pour la nomenclature des fichiers et des relations correspondantes (cf. figure 2.2).

<i>Fon</i>	Fonds de cartes	<i>Vec</i>	Dessins vectorisés
		<i>Top</i>	Cartes topographiques
		<i>Pho</i>	Photographie
<i>Eau</i>	Eau	<i>Hyd</i>	Hydrodynamisme
		<i>Riv</i>	Hydrologie des rivières
		<i>Col</i>	Colonne d'eau
<i>Sed</i>	Sédiments	<i>Bge</i>	Biogéochimie
		<i>Geo</i>	Géochimie
		<i>Bse</i>	Biosédimentologie
		<i>Sed</i>	Sédimentologie
<i>Org</i>	Organismes	<i>Eco</i>	Ecologie
		<i>Hal</i>	Halieutique
		<i>Acc</i>	Bioaccumulation
<i>Act</i>	Activité sociale	<i>Pec</i>	Pêche
		<i>Tou</i>	Tourisme
		<i>Pro</i>	Professionnel

fig. 2.2 – Nomenclature des fichiers

Un nom de relation comporte au maximum 16 caractères (seuil imposé par SAVANE). Les 6 premiers permettent de situer le domaine, les quatre suivants concernent la date, les derniers sont plus libres. Par exemple : OrgEco9798metab, signifie que cette relation concerne les données de métabolismes des organismes pour les années 1997 et 1998). Cette nomenclature permet à l'utilisateur du SIG de trouver et d'afficher la relation qui l'intéresse. Le nom de la relation indique son contenu. Pour l'administrateur de la base, il est facile, s'il doit le modifier, de retrouver le fichier de localisation ou de valeurs associé à la relation.

Mais, cette nomenclature ne suffit pas pour renseigner totalement l'utilisateur sur le contenu d'une relation.

21..5. *Le dictionnaire de la base*

Afin de compléter la description des relations et d'archiver les métadonnées, un dictionnaire a été élaboré. Il est disponible à l'utilisateur (cf. annexe 2.1). Il est divisé en deux parties distinctes. La première décrit les relations de la base, la seconde décrit les attributs de ces relations. Il est sous format Microsoft Excel 97. Les intérêts de ce format sont les suivants :

- il est familier à pratiquement tous les utilisateurs potentiels du SIG,
- les deux parties du dictionnaires (relations et attributs) sont séparées, ce qui permet une bonne lisibilité,
- on peut naviguer facilement entre les relations et leurs attributs par lien hypertext.

2.2.LES IMAGES DE TELEDETECTION

22..1. Les images satellites

Les satellites utilisés en télédétection en milieu côtier et lagunaire sont essentiellement les satellites SPOT, SeaWifs et Landsat.

2.2.1.1. Le satellite Landsat7 ETM+

Le programme Landsat produit depuis plus de 25 ans des données concernant la surface de la Terre qui sont utilisées pour les besoins scientifiques, économiques, éducatif, militaires, etc. Le but de ce programme est de fournir des acquisitions répétitives de données multispectrales à fin de mieux comprendre des changements environnementaux naturels ou provoqués par l'Homme.

Le premier satellite Landsat a été lancé en 1972. Landsat7 ETM+ a été lancé en avril 1999. Sa mission est de [www1] :

- produire des données dans la continuité avec celles de Landsat 4 et 5
- offrir une occurrence des scènes de 16 jours
- construire et réactualiser la couverture totale de la planète par des scènes éclairées, sans nuage
- produire des images à prix réduit et répondant aux attentes des utilisateurs
- aider les organismes gouvernementaux, internationaux et commerciaux dans leurs travaux

Landsat7 ETM+ est capable de saisir environ 250 scènes par jours [GAS99]. Cette capacité de stockage est inférieure à la totalité des scènes possibles⁵. Il existe donc des zones photographiées prioritairement. La résolution temporelle de 16 jours n'est donc que théorique mais néanmoins réalisable si la scène saisie est classée prioritaire. Sur le lagon sud-ouest, on peut espérer obtenir une dizaine de clichés pour l'année 2000.

2.2.1.2. L'utilisation des images Landsat7 (d'après [www1])

Elles sont nombreuses et résumées dans la liste ci-dessous (cf. figure 2.3).

⁵ Dans le cadre du Landsat7 Long Term Acquisition Plan, 14 000 scènes cibles ont été choisies. Parmi elles, 878 contiennent des récifs coralliens. 70% d'entre-elles sont photographiées au moins deux fois par an. Les récifs "prioritaires" le sont au moins 12 fois [GAS99].

1. **Agriculture, Foresterie and Range Resources**
 - Discriminating vegetative, crop and timber types
 - Measuring crop and timber acreage
 - Precision farming land management
 - Monitoring crop and forest harvests
 - Determining range readiness, biomass and health
 - Determining soil conditions and associations
 - Monitoring desert blooms
 - Assessing wildlife habitat
 - Characterizing forest range vegetation
 - Monitoring and mapping insect infestations
 - Monitoring irrigation practices
2. **Land Use and Mapping**
 - Classifying land uses
 - Cartographic mapping and map updating
 - Categorizing land capabilities
 - Monitoring urban growth
 - Aiding regional planning
 - Mapping transportation networks
 - Mapping land-water boundaries
 - Siting transportation and power transmission routes
 - Planning solid waste disposal sites, power plants and other industries
 - Mapping and managing flood plains
 - Tracking socio-economic impacts on land use
3. **Geology**
 - Mapping major geologic features
 - Revising geologic maps
 - Recognizing and classifying certain rock types
 - Delineating unconsolidated rocks and soils
 - Mapping volcanic surface deposits
 - Mapping geologic landforms
 - Identifying indicators of mineral and petroleum resources
 - Determining regional geologic structures
 - Producing geomorphic maps Mapping impact craters
4. **Hydrology**
 - Determining water boundaries and surface water areas
 - Mapping floods and flood plain characteristics
 - Determining area extent of snow and ice coverage
 - Measuring changes and extent of glacial features
 - Measuring turbidity and sediment patterns
 - Delineating irrigated fields
 - Monitoring lake inventories and health
 - Estimating snow melt runoff
 - haracterizing tropical rainfall
 - Mapping watersheds
5. **COASTAL RESOURCES**
 - Determining patterns and extent of turbidity
 - Mapping shoreline changes
 - **Mapping shoals, reefs and shallow areas**
 - Mapping and monitoring sea ice in shipping lanes
 - Tracking beach erosion and flooding
 - **Monitoring coral reef health**
 - Determining coastal circulation patterns
 - **Measuring sea surface temperature**
 - Monitoring and tracking 'red' tides
6. **Environmental Monitoring**
 - Monitoring deforestation
 - Monitoring volcanic flow activity
 - Mapping and monitoring water pollution
 - Determining effects of natural disasters
 - Assessing drought impact
 - Tracking oil spills
 - Assessing and monitoring grass and forest fires
 - Mapping and monitoring lake eutrophication
 - Monitoring mine waste pollution
 - Monitoring volcanic ash plumes

fig. X – Utilisation des images Landsat7 (d'après [www1])

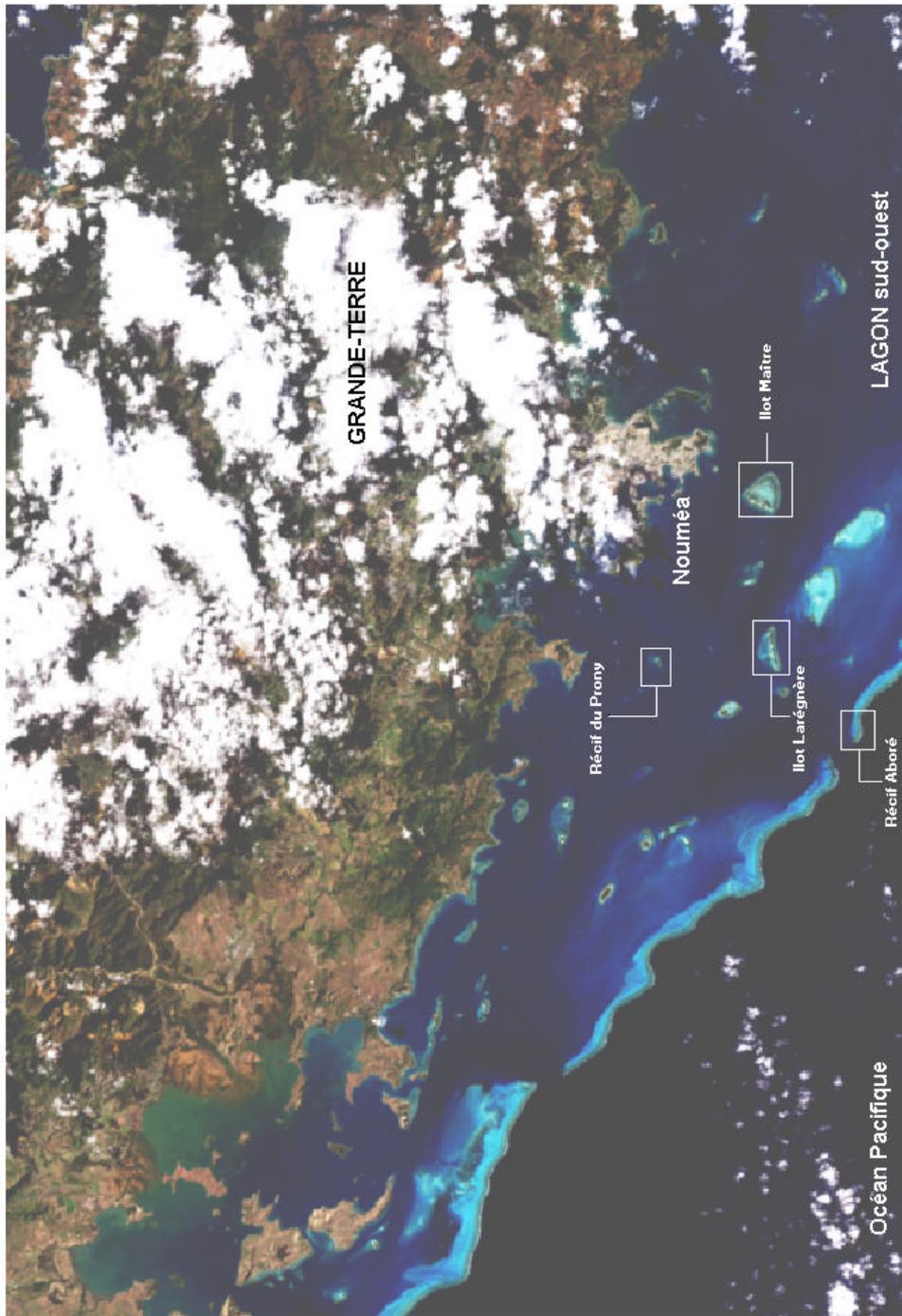


fig. 2.4 - Composition colorée à partir des 3 premières bandes spectrales de Landsat7 ETM+ sur le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie

2.2.1.3. Bandes spectrales et résolution

Les images Landsat7 sont commercialisées par l'USGS⁶. Elles sont disponibles sur Compact Disc ou cassette au format HDF (Hierarchical Data Format). Elles peuvent aussi être téléchargées. La scène photographiée à une taille de 180 km par 180 et englobe une grande partie du lagon sud-ouest de Nouméa (cf. figure 2.4). La taille du pixel est de 15, 30 ou 60 mètres selon les bandes spectrales (cf. figure 2.5).

N° de la bande	Largeur de bande (µm)	Résolution (m)
1	0.45 à 0.52	30
2	0.52 à 0.60	30
3	0.63 à 0.69	30
4	0.76 à 0.90	30
5	1.55 à 1.75	30
6	10.4 à 12.5	60
7	2.08 à 2.35	30
8 PAN	0.50 à 0.90	15

fig. 2.5 – Caractéristiques des bandes spectrales de Landsat7 (d'après [www1])

Les 3 premières bandes sont situées dans le spectre visible, la 4^{ème}, la 5^{ème} et la 7^{ème} sont dans l'infra-rouge, la 6^{ème} dans l'infra-rouge thermique. La 8^{ème} bande est panchromatique.

Les bandes utilisées pour la classification en milieu côtier sont actuellement les 4 premières bande proche infra-rouge et pour une résolution de détails, la bande panchromatique⁷.

2.2.1.4. La scène Landsat7 utilisée

Il existe pour le moment 5 clichés concernant le lagon sud-ouest de Nouméa (point central : 23.11° latitude sud, 174.41° longitude ouest). Malheureusement, selon la couverture nuageuse, ils ne sont pas tous utilisables. La couverture nuageuse des 5 clichés est donnée dans le tableau 2.1.

Date	Couverture nuageuse (% de la surface)
11/08/99	10
15/11/99	46
06/03/00	13
07/04/00	31
25/05/00	34

tab. 2.1 – Couverture nuageuse sur les 5 scènes L7 disponibles au 25/05/00 (d'après [www1])

La scène choisie est celle du 11 août 1999, 22H43min58s (GMT), pour les deux raisons suivantes :

- c'est la scène la moins couverte de nuages sur les zones d'intérêt (lagon),
- la date de prise de vue correspond à un échantillonnage concernant la chimie de l'eau effectué dans le cadre du programme ECOTROPE.

L'USGS propose les clichés Landsat7 sous trois formes :

- L0 : l'image est brute. Aucune correction n'a été effectuée (\$400)
- L1R : l'image a subi des corrections radiométriques et géométriques (\$600)
- L1G : c'est une image L1R géoréférencée (\$600)

⁶ United States Geological Survey

⁷ communication personnelle de S. ANDREFOUET, University of South Florida, USA – Department of Marine Science

Le niveau de correction choisi pour la scène utilisée est L1R. En effet, le géoréférencement réalisé par l'USGS ne serait pas toujours de très bonne qualité. Dans ces conditions, il serait impossible de retirer un bruit périodique de l'image puisque celle-ci est déformée par le géoréférencement [communication personnelle de S. ANDREFOUET].

22..2. Les images aériennes

Les photographies disponibles sur le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie sont les suivantes (cf. figure 2.6) :

Date	Heure	Altitude (m)	N&B / Couleurs	Source	Localisation
05/2000	-	-	Couleurs	GéoEx	Ilot Maître
06/06/2000	15H30	2400	Couleurs	GéoEx	Ilot Larégnère
06/06/2000	15H50	1000	Couleurs	GéoEx	Récif Ricaudy

fig. 2.6 – Description des photographies aériennes

Elles sont issues du programme de suivi des réserves du lagon sud-ouest commandé par la Province Sud. Elles ont été numérisées à 150 dpp. Ce sont des ortho-images.

22..3. Préparation, intégration et classification des images dans le SIG

Si l'on veut dépasser la simple utilisation de l'image en tant que fond d'écran, il est nécessaire de définir les chaînes de traitement qui permettent de transformer la donnée-image en véritable information géographique. Si l'on cherche à comparer plusieurs images entre elles ou bien à mesurer un paramètre de façon quantitative à partir du signal rétrodiffusé sur une seule scène il est nécessaire de procéder à certaines corrections [CUQ96].

Le traitement des images Landsat7 utilisées se décompose en 4 étapes : les prétraitements, la préparation de la zone d'intérêt, l'intégration de l'image et la classification.

2.2.3.1. Les prétraitements

- la correction des effets liés au fonctionnement des capteurs

On corrige deux effets principaux : la dérive des capteurs et la fonction de transfert de modulation (FTM). La dérive des capteurs est une perte de sensibilité au cours du temps. Elle se corrige par suivi de cibles invariantes au sol⁸. La FTM d'un capteur satellitaire représente l'atténuation de l'amplitude de variation du signal d'entrée en fonction de sa fréquence⁹. Elle se corrige en divisant la transformée de Fourier de l'image par un modèle de variation de la FTM en fonction de la fréquence spatiale¹⁰.

- la correction de l'éclairement

Dans les domaines du visible et du proche infrarouge, les variations de l'éclairement sont dues au changement de l'angle zénithal solaire et de la distance Terre-Soleil. La correction de la variation de l'angle zénithal solaire est opérée en effectuant le rapport de la réflectance mesurée sur le cosinus de l'angle solaire. La prise en compte des variations de distance Terre-Soleil au cours de l'année peut être réalisée en utilisant un coefficient pondérateur

⁸ d'après COSNEFROY H, BRIOTTET X., LEROY M., LECOMTE P., SANIER R., In field characterisation of saharian sites for satellite calibration, IGARRS'94 proceedings, n°940579, cité dans [CUQ96]

⁹ d'après GUYAUT G., GU X.F., CLASTRE P., Correction de la FTM sur les images SPOT, Photo-Interprétation, 90-6, 1992, fasc. 2. cité dans [CUQ96].

¹⁰ d'après BOREMAN G.D., YANG S., Modulation Transfer Function measurement using three – and four – bar targets, Applied Optics, février 1995, cité dans [CUQ96].

(variant de 0 à 1) variant en fonction du jour julien de l'enregistrement [CUQ96].

- *les corrections atmosphériques*

Deux corrections doivent s'appliquer : celle qui s'applique aux effets de diffusion par les hautes couches de l'atmosphère (diffusion de Rayleigh), qui varient avec la saison et la latitude, et celle qui concerne l'hétérogénéité des basses couches (diffusion de Mie), qui varient en fonction de la présence de brumes, poussières, etc. La correction des variations de diffusion de Rayleigh s'opère à l'aide de modèles qui fournissent des résultats globalement satisfaisants. La correction des variations de diffusion de Mie, au-dessus de la mer, utilise généralement la bande spectrale centrée sur l'infrarouge proche [CUQ96].

- *les corrections géométriques*

La correction de la rotondité de la Terre s'opère à l'aide d'équations analogues à celles utilisées pour les projections cartographiques. La correction de l'effet de rotation de la Terre pendant la durée d'acquisition peut s'effectuer par la prise en compte des caractéristiques orbitales du satellite et de la vitesse de balayage du capteur [CUQ96].

L'ensemble de ces traitements (exceptée la correction de la rotondité de la Terre) sont effectués par l'USGS pour un niveau de correction L1R.

2.2.3.2. *La préparation des images en fonction des zones d'intérêt*

La scène Landsat7 a les dimensions suivantes : une largeur de 6600 pixels et une hauteur de 6000 pour les bandes spectrales utilisées. Le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie se situe dans la partie basse de l'image choisie et n'est pas présent en totalité. Les clichés correspondants aux zones voisines sont disponibles et pourront être achetés si l'imagerie Landsat7 se révèle, par mon étude, intéressante. La zone sélectionnée fait 90 km de large par 50 de haut. L'ensemble des opérations à réaliser est décrit en annexe 2.2.

Afin de ne pas commettre d'erreur dans l'interprétation des images, il est préférable de masquer les nuages présents sur la scène, ainsi que leurs ombres. Cette tâche est difficilement automatisable. La recherche automatique (par classification supervisée) ne fournit pas de résultats satisfaisants. Les nuages n'ont pas tous la même épaisseur : les codes numériques les caractérisant sont trop variables pour espérer un repérage efficace. Le masquage des nuages et de leurs ombres se fait donc à la main, sur Erdas IMAGINE 8.3.1. (cf. annexe 2.2). Les résultats de l'interprétation des images au niveau des bords de masques devra se faire avec prudence : le voile nuageux, non visible à l'œil, peut s'étendre au-delà du masque tracé et modifier les codes numériques des pixels touchés.

Les zones terrestres sont également masquées afin d'accélérer la vitesse des traitements informatiques de classification.

2.2.3.3. *L'intégration des images dans le SIG SAVANE*

SAVAMER permet le redressement, le géoréférencement et l'intégration d'images de type bitmap (BMP), SPOT, ou generic binary sous forme de couches géographiques. L'ensemble de ces étapes est décrit dans le manuel de l'utilisateur. Les images Landsat7 sont de type generic binary mais ne sont pas reconnues par SAVAMER. Elles doivent donc être transformées en BMP afin d'être importées dans le SIG (cf. annexe 2.2). Les 4 premières bandes spectrales sont intégrées dans SAVANE (cf. figure 2.7).

N° de la bande	Largeur de bande (µm)	Résolution (m)
1	0.45 à 0.52	30
2	0.52 à 0.60	30
3	0.63 à 0.69	30
4	0.76 à 0.90	30

fig. 2.7 – Caractéristiques des 4 premières bandes spectrales de L7

Ce sont en effet les bandes spectrales informatives en milieu lagunaire et récifal¹¹.

2.2.3.4. La classification des images

Principe général

SAVANE permet d'effectuer des opérations arithmétiques et logiques sur la valeur des codes numériques des images intégrées. Il est donc possible de réaliser une classification multivariées tenant compte des 4 bandes spectrales.

Afin de construire un modèle de classification utilisable sur l'ensemble du lagon sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie, la méthode appliquée vise à déterminer (sur des images de tailles réduites) des signatures spectrales pures des biotopes lagunaires. Les notions de voisinage des pixels ne seront donc pas utilisées. Les signatures spectrales se présentent sous forme de valeurs seuils minimum et maximum dans chaque bande spectrale utilisée.

Pour une classe, on a donc un code numérique minimum (CN_jmin) et un code numérique maximum (CN_jmax) pour chaque bande spectrale j. Un pixel p appartient à la classe K si et seulement si :

$$CN_{j,\min}(K) \leq CN_j(p) \leq CN_{j,\max}(K), \text{ pour } j = 1, 2, 3 \text{ et } 4$$

La classification réalisée, basée uniquement sur la valeur des codes numériques, est donc non supervisée. Les manipulations relatives à la classification des pixels dans SAVANE sont décrites en annexe 2.3.

L'établissement du modèle de classification se fait en 3 étapes :

- 1- analyse de la variabilité de l'information et filtrage du bruit,
- 2- recherche de classes dites naturelles dans le jeu de données,
- 3- recherche de combinaisons des 4 bandes spectrales permettant de retrouver une bonne affectation des pixels dans les classes précédentes.
- 4- applications et corrections

Identification des seuils (d'après [FER00])

La classification est le processus de partition d'un ensemble d'individus en classes. Elle s'effectue en général en deux étapes. La première étape est l'apprentissage. L'apprentissage se charge d'acquérir la connaissance sur l'ensemble des classes. La deuxième étape est le classement. Le classement est le processus d'affectation de chaque individu dans une des classes définies par l'apprentissage [PUM99]. Ces deux étapes sont effectuées en dehors de SAVANE. Le logiciel de statistiques utilisé est SPAD.

L'apprentissage commence par l'étude de la structure de corrélation des 4 variables et de la variabilité en terme d'inertie¹² des pixels par analyse en composante principale (ACP). L'ACP

¹¹ (d'après ANDREFOUET S. (2000, 4 avril). Bandes spectrales L7 [e-mail destiné à Guénolé Bouvet], [En ligne]. Adressé par courrier électronique : bouvet@noumea.ird.nc).

¹² Soient n individus d'observations x_1, x_2, \dots, x_n , x_i étant un vecteur de \mathbb{R}^p . L'inertie totale du nuage des individus par rapport à un point a de \mathbb{R}^p est ^[PUM99] :
$$I_a = \sum_{i=1}^n d_{M}^2(x_i, a)$$

est basée sur l'analyse de la matrice de corrélations des 4 variables (chaque variable étant centrée réduite). L'inertie globale est décomposée par la recherche d'axes d'inertie décroissante, combinaisons linéaires des 4 variables de départ. Les axes ainsi générés sont indépendants. On peut alors obtenir le pourcentage d'inertie expliqué par les axes et la contribution des différentes variables à la définition des axes. La classification sera effectuée selon les valeurs des coordonnées des pixels sur les axes factoriels jugés pertinents (ceux qui expliquent la variabilité de la population).

L'algorithme de classification utilisé est un algorithme mixte adapté à la partition d'un ensemble volumineux de données [LEB95]. A ce niveau, les pixels n'ont plus comme valeurs associées les codes numériques des 4 bandes spectrales mais un nombre de valeur égal au nombre d'axes factoriels pertinents. Les valeurs pour chaque pixel sont des combinaisons linéaires des codes numériques de départ. Les étapes sont les suivantes :

- 1- Partitionnement par agrégation autour de centres mobiles (noyaux) par la méthode des nuées dynamiques (d'après DIDAY, 1971). Les noyaux sont choisis au hasard et sont au nombre de 10. On effectue l'opération 2 fois avec des noyaux différents et on croise les deux partitions. Il apparaît alors des groupements stables¹³ de pixels parmi les 100 (10x10) obtenus. Ces groupements sont gardés pour l'étape suivante.
- 2- Classification ascendante hiérarchique (CAH). On utilise ici le critère de Ward : minimisation de la variance intra-classe et donc maximisation de la variance inter-classe. Cette étape permet de reconstituer les classes qui ont été fragmentées et d'agréger les éléments apparemment dispersés autour de leurs noyaux.
- 3- Coupure de l'arbre hiérarchique. Cette coupure est effectuée après les agrégations correspondant à des valeurs peu élevées de l'indice d'agrégation qui regroupent des éléments les plus proches les uns des autres et avant les agrégations correspondant à des valeurs élevées de l'indice qui dissocient les groupes bien distincts dans la population.
- 4- Optimisation de la partition par nuées dynamiques (les noyaux sont les centroïdes des classes obtenues à l'étape 3).

A ce niveau, l'étape d'apprentissage est terminée.

Le classement de la population totale des pixels par la recherche de conditions discriminantes sur les 4 bandes spectrales peut alors être réalisé. La méthode utilisée est une segmentation. Elle correspond à une analyse discriminante non paramétrique. Il s'agit d'une part de sélectionner les variables les plus discriminantes et d'autre part de construire une règle de décision permettant d'affecter un pixel à l'une des classes. La segmentation s'effectue sur les classes obtenues à l'étape précédente. Par la méthode CART elle permet de déterminer un arbre de segmentation optimal (d'après BREIMAN *et al*, 1984). Cet arbre est élagué et seules les branches les plus informatives en terme de discrimination entre les classes sont gardées (minimisation de la variance intra-classe et maximisation de la variance inter-classe).

On obtient donc un modèle d'affectation des pixels aux différentes classes d'après les codes numériques des bandes spectrales discriminantes. De plus, la composition des classes polythétiques¹⁴ est précisée.

Tous les pixels ne sont donc pas classifiés mais on obtient des segments correspondant à une même réponse spectrale.

La pertinence de cet algorithme peut être évaluée par la comparaison de la classification produite avec la vérité terrain.

¹³ Un groupement est stable lorsque le nombre de pixels situés dans une intersection constituée par un groupe issu de la première nuée dynamique et par un groupe de la deuxième comporte strictement plus de 2 pixels.

¹⁴ Une classe est dite polythétique si les individus qui la constituent ne sont pas identiques : ils s'écartent significativement en terme de distance euclidienne du centroïde des pixels de la population de la classe : ils présentent des signatures spectrales différentes.

3. RESULTATS

3.1. CONSTRUCTION D'UN MODELE DE CLASSIFICATION SUR UNE ZONE LAGONAIRE : L'ÎLOT MAÎTRE

31..1. Description du milieu

L'Îlot Maître est un îlot corallien : il s'est formé grâce au développement des coraux et à leur érosion (levées détritiques). Le substrat émergé ainsi formé a été progressivement colonisé par différentes espèces végétales. Le côté au vent de l'îlot (à l'est) forme un platier. C'est essentiellement cette zone qui nous intéresse. C'est une dalle de sable durci, recouverte partiellement de sable, de patates de corail, de corail mort, d'herbiers et d'algues diverses. L'Îlot Maître est situé dans une réserve marine. La pêche y est interdite.

Au-delà de l'intérêt touristique que représente l'îlot, il faut noter l'importance écologique et donc économique des différents biotopes qui composent le platier [Communication personnelle, M. KULBICKI].

- Les herbiers abritent une grande quantité de juvéniles d'espèces commerciales de poissons. Ils représentent une étape obligatoire dans le cycle de reproduction de ces espèces. De nombreuses espèces de Mollusques y vivent et sont pêchées. Curieusement, un herbier clairsemé abrite moins de prédateurs qu'un herbier dense. Dans un herbier dense, les Invertébrés se cachent plus facilement, ce qui rend la chasse plus difficile pour les prédateurs. Les herbiers ont de plus un rôle de captage de particules.
- Les algueraias représentent une étape intermédiaire pour les espèces commerciales de poissons entre le récif et les fonds meubles. On y trouve de nombreux juvéniles.
- Les fonds meubles libres sont des surfaces de sables où la densité de poissons est faible. Cependant, de part leur surface très étendue, ils représentent un grand réservoir d'espèces commerciales de poissons. On y pêche des Mollusques comme les Pecten.
- Les fonds meubles parsemés de patates de corail ont une densité de poissons importante. On y trouve des Crustacées comme les langoustes et des Mollusques (Pecten). Ce sont les fonds (avec les estuaires et les mangroves) les plus pêchés du lagon.
- Le récif frangeant contient l'essentiel des espèces commerciales récifales pêchées.

Les dimensions du platier sont les suivantes : distance maximale NE – SO : 2350 m, distance maximale NO – SE : 2350 m, pour une surface de 440 ha. Ces dimensions sont mesurées (avec les outils de calcul de surface de SAVANE) sur une photographie aérienne intégrée à la base de données géographiques et correspondant à la zone d'étude (cf. figure 3.0).

31..2. Résultats de la classification

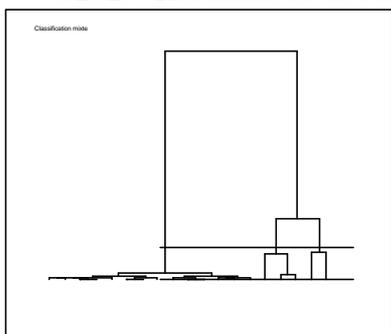


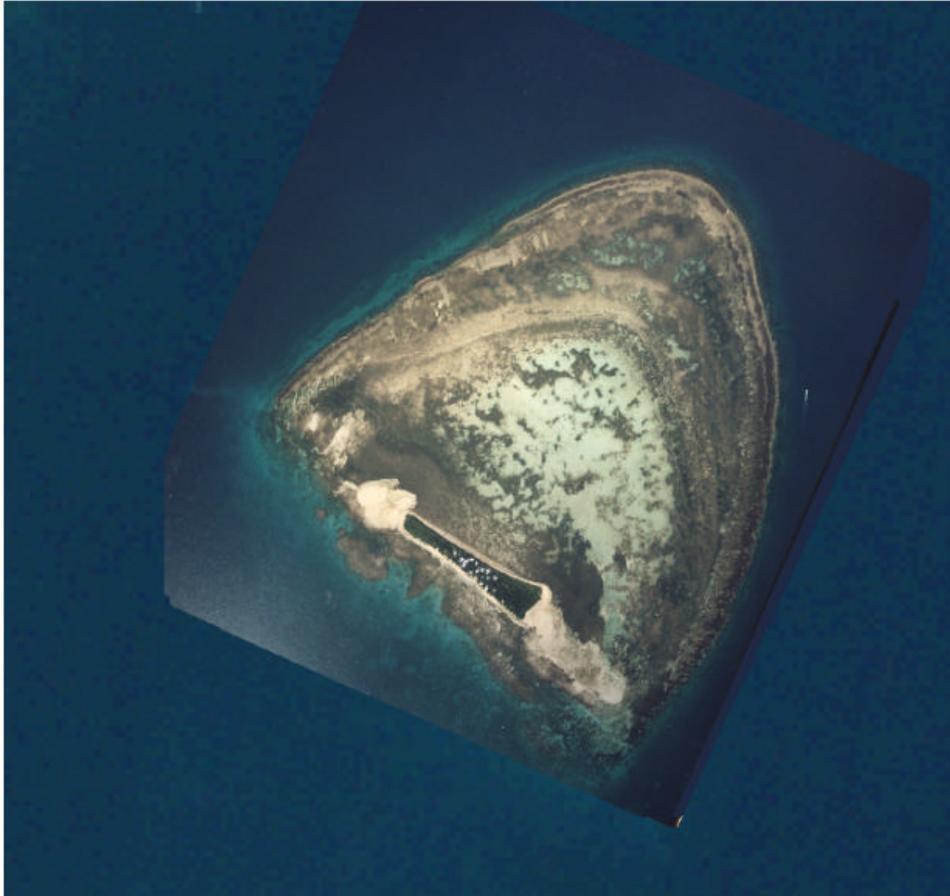
fig. 3.1 – coupures de l'arbre issu de la CAH.

La classification SPAD expliquée dans Matériel et méthodes retient comme pertinentes une coupure de l'arbre issu de la CAH au niveau de 3, 5 et 7 classes dans la population de pixels (cf. figure 3.1 ci-contre). Puisque le nombre de milieu différents sur la zone *est a priori* supérieur à 5, la coupure de l'arbre au niveau 7 classes est conservée.

La zone d'étude couvre 21 736 pixels. A l'issue de la segmentation, 47 segments apparaissent. On considère que les segments dont l'effectif est inférieur à 15 pixels peuvent être négligés.



Ilot Maître - Landsat7
Composition colorée à partir des bandes 1, 2 et 3



Ilot Maître - Photographie aérienne

fig. 3.0 - Image Landsat7 et photographie aérienne de l'Ilot Maître

30 segments sont ainsi supprimés. Dans ces conditions, la surface classifiée atteint 98.5 % (21411 pixels) de la surface totale de l'image. Les 17 segments composant les 7 classes sont affichés à l'écran (cf. annexe 3.1). On s'aperçoit que les 7 classes obtenues présentent une contiguïté de leurs pixels. D'un point de vue géographique, les classes ont donc un sens. Elle représente une réalité sur le terrain.

Afin de réaliser une première identification des milieux mis en évidence par la classification, on superpose les masques des classes trouvées ci-dessus à l'information contenue sur la photographie aérienne. Pour étudier les propriétés spectrales des classes, on représente les boîtes de dispersion correspondantes pour chaque bande spectrale (cf. annexe 3.2). Les résultats sont les suivants :

La classe 1 :

C'est la classe dont la médiane est minimum pour chaque bande spectrale. Les objets concernés sont ceux qui réfléchissent le moins dans le domaine visible. Pour la classe 1, la médiane la plus forte se situe dans le bleu (bande 1) puis dans le vert (bande 2).

Cette classe identifie manifestement l'eau profonde. Le calcul des statistiques de données bathymétriques sur la zone correspondant à cette classe donne les résultats suivants (cf. figure 3.2) :

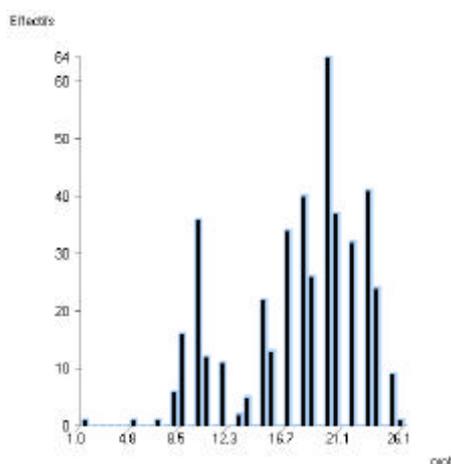


fig. 3.2 – Bathymétrie pour la classe 1

La profondeur minimale de 1 mètre semble non significative (1 seul pixel concerné). La profondeur minimale significative est plutôt de 8 mètres. La moyenne observée est de 17.9 mètres (pour un écart-type de 3.7). On peut noter sur la figure 3.2 la présence de 2 modes identifiant 2 populations bathymétriques différentes. Ces différences bathymétriques ne transparaissent pas dans la classification.

La classe 2 :

On constate, pour la bande 1 et 2, que la médiane de C1 est inférieure à la médiane de C2, elle-même inférieure à la médiane des autres classes. Pour la bande 3 et 4, la médiane de C2 est minimum. Les objets concernés sont donc sombres, mais relativement moins que ceux rassemblés dans C1 : l'absorption est moins forte. On peut penser que cette classe concerne des zones de plus faible profondeur.

Les données bathymétriques restreintes à cette zone ont les propriétés suivantes : la profondeur se situe entre 0 et 24 mètres, avec une moyenne à 9.0 mètres et un écart-type de 5.3 (cf. figure 3.3).

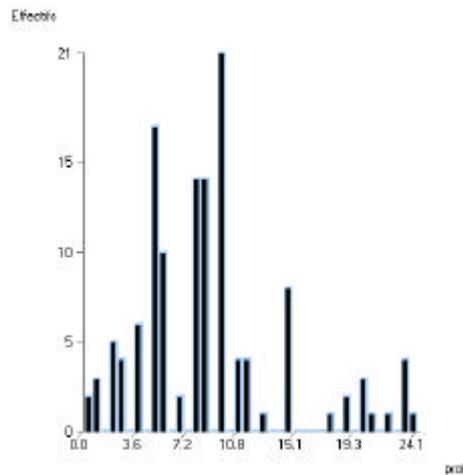


fig. 3.3 – Bathymétrie pour la classe 2

Sur la photographie aérienne, on constate que les zones concernées sont situées majoritairement autour du platier : faux-tombant et sous le vent de l'îlot, dans une zone de faible profondeur avec des substrats divers. La classe 2 englobe également deux petites zones situées sur le platier (profondeur inférieure à 1 mètre) et composée a priori d'herbiers ou d'algueraies.

Remarques : à la lecture de la figure 3.2 et de la figure 3.3, on observe qu'il y a recouvrement entre les 2 classes en terme de profondeur. Les seules différences de bathymétrie n'expliquent donc pas la distinction entre les deux classes.

La classe 6 :

Elle se distingue dans la bande 4 (proche infrarouge : PIR) par la forte valeur de sa médiane : 240, contre 10 pour les autres classes. Les objets rassemblés dans cette classe émettent donc fortement dans le PIR. Sachant que les PIR sont fortement absorbés par l'eau, cette classe identifie des objets émergés.

Sur la photographie, on constate que la classe concerne les plages de sables non recouvertes d'eau en bordure de l'îlot et les bâtiments au toit de tôle situés sur l'îlot.

Sur les boîtes de dispersion (annexe 3.2), on constate de plus que la classe 6 est celle qui a la plus grande variabilité quelque soit la bande spectrale considérée. C'est logique : les objets de la classe 6 étant émergés, ils ne subissent pas l'effet tampon de l'eau sur la variabilité du signal.

La classe 3 :

Elle identifie des zones reconnues *a priori*¹⁵ comme des herbiers ou algueraies étendus, des herbiers ou algueraies isolés, des cuvettes de fond sableux parsemées de patates coralliennes et des zones indéterminées.

La classe 5 :

Elle identifie *a priori* des herbiers ou algueraies peu denses étendus ou isolés sur fonds sableux.

¹⁵ L'interprétation des classes en terme de biotope sont réalisées à ce niveau par la comparaison avec la photographie aérienne et par discussion avec les chercheurs et plongeurs qui connaissent la zone Îlot Maître ou des zones similaires.

La classe 4 :

Elle identifie *a priori* des zones d'herbiers ou algueraies très peu denses, des zones de débris coralliens (?), quelques fonds sableux.

La classe 7 :

Elle identifie clairement les zones de fonds sableux en eau très peu profondes (profondeur inférieure à 1 mètre).

Spectralement, les classes 3 et 5 sont assez similaires avec une constante : la valeur de la médiane pour C5 est supérieure à celle de C3, pour les 3 bandes spectrales du domaine visible. Si la classe C3 identifie entre autres des herbiers denses et C5 des herbiers épars, cette caractéristique spectrale est logique : un herbier épars laissant plus apparaître le fond sableux clair dont le signal spectral est fort.

De même, les classes 4 et 7 sont proches en terme de signature spectrale. Si l'on exclue la zone émergée correspondant à la classe 6, C4 et C7 ont les valeurs de médianes les plus élevées dans chaque bande. Elles identifient donc des fonds clairs. Les médianes de C4 sont plus faibles que celles de C7. La différence de substrat reste à identifier.

La composition des classes sera précisée par la suite.

La classification SPAD nous a fourni 17 segments. Le nombre de pixels dans chaque segment est très variable. Dans chaque classe, un segment domine :

- segment 1 : il correspond à 99,5 % de la classe 1,
- segment 5 : 96.0 % de la classe 2,
- segment 7 : 87.8 % de la classe 3,
- segment 12 : 83.8 % de la classe 5,
- segment 15 : 94.2 % de la classe 4,
- segment 16 : 100 % de la classe 6,
- segment 17 : 100 % de la classe 7.

Un segment se distingue des autres : le segment 2 (cf. annexe 3.1, "classe 2"). Il représente seulement 4% de la classe 2. Il concerne plusieurs groupes de pixels situés le long du récif frangeant mais un groupe de pixels se situe visiblement sur une zone d'herbier ou d'algueraie. C'est le seul groupe de pixels de la classe 2 à concerner ce biotope. On peut se demander pourquoi ce groupe de pixels n'a pas été identifié dans la classe 3 ou 4.

Bilan de la classification : la contiguïté des pixels regroupés dans la même classe ne résulte d'aucune considération de voisinage pendant la classification (cf. Matériel et méthodes). Elle s'explique donc par une continuité sur le terrain en terme bathymétrique et/ou sédimentologique (substrat et turbidité), facteurs principaux agissant sur la valeur des codes numériques. On peut se demander dans quelle mesure la classification tient compte de ces facteurs.

31..3. Qualité du modèle

3.1.3.1. Correction du modèle

Même si les classes obtenues semblent être significatives, leur superposition sur la photographie aérienne révèle des lacunes importantes dans l'identification des différents

biotopes. On constate que le modèle ne permet pas de distinguer des éléments visiblement différents. C'est le cas par exemple sous le vent de l'îlot : la zone sombre présente sur la photographie (cf. annexe 3.3) n'est pas identifiée par le modèle.

A partir des mêmes données numériques, on revoit le modèle en imposant à l'algorithme de classification un nombre de classes plus élevé. Le nombre de classes maximum significatives d'un point de vue statistique est de 10 (seuil déterminé par SPAD). On choisit donc une classification en 10 classes. Le nombre de segments conservés est de 37¹⁶. Le modèle ainsi construit est nommé modèle Ilot Maître.

On peut calculer que 98.6 % de la zone est classifiée. La moitié des classes concerne les zones d'eau plus ou moins profondes entourant le platier. L'autre moitié classifie les biotopes situés sur le platier.

En annexe 3.4, on peut voir la localisation des 5 premières classes et les données bathymétriques associées. Même si, de la même façon que pour le modèle précédent, les données bathymétriques se recoupent entre les classes, on peut voir que chaque classe est assez caractéristique d'une profondeur :

- C02 concerne essentiellement les zones d'une profondeur de 20 mètres. Elle borde le platier au vent,
- C01 regroupe des zones à 20 mètres et 10 mètres. Elle entoure l'îlot,
- C03 est une classe plus hétérogène avec une moyenne à 17 mètres,
- C04 concerne des zones de profondeur plus faible : entre 5 et 10 mètres essentiellement, situé sur le tombant et sous le vent de l'îlot,
- C05 contient les zones les plus proches du platier, sur le tombant et sous le vent. La profondeur est comprise entre 0 et 10 mètres.

Avec 5 classes contre 2 pour le modèle précédent, on obtient une meilleure description du milieu "en eau profonde" . On constate, sous le vent de l'îlot, que les zones sombres (cf. annexe 3.3) n'ont pas été intégrées à ces classes. Cependant, comme dans le modèle précédent, deux zones situées sur le platier sont identifiées dans C03.

Sur le platier, on obtient 5 classes quasiment identiques à celles du modèle précédent (cf. annexe 3.5). Néanmoins, on peut voir que la classe C06 délimite sous le vent de l'îlot les zones sombres identifiées sur la photographie aérienne.

Dans la partie suivante, on précise la composition des 5 classes du platier.

3.1.3.2. *La vérité terrain*

Afin d'évaluer la qualité de la classification réalisée avec le modèle Ilot Maître, on réalise une campagne de vérité terrain. Les résultats de cette campagne permettront de valider ou infirmer le modèle. Ils permettront également d'affiner le modèle s'il est validé.

Méthodes

A l'écran, avec le logiciel SAVANE, on définit deux transects. Ils sont choisis tels qu'un maximum de classes identifiées par le modèle soient traversées. Plusieurs zones isolées font également partie des observations à réaliser. Les coordonnées en IGN72 sont transformées en coordonnées GPS (WGS84) et intégrées dans un récepteur GPS portable¹⁷. La localisation des

¹⁶ On conserve un segment lorsque :
(% de l'effectif du segment dans sa classe) x (% de l'effectif du segments parmi l'ensemble des segments)
0.07. Ce seuil est fixé arbitrairement et conservé par la suite.

¹⁷ GPS 12 XL de la marque Garmin.

observations est décrite en annexe 3.6. On mesure la profondeur¹⁸ avec un décimètre et on observe la nature du fond avec une lunette calfa depuis l'embarcation¹⁹. Les résultats sont consignés sur papier (cf. annexe 3.7). Pour éviter les coups de soleil on utilise une crème solaire écran total.

Résultats

Ils sont intégrés dans la base de données. Même s'ils sont peu nombreux (une cinquantaine), ils permettent de préciser la nature des biotopes identifiés par les différentes classes.

En annexe 3.8, sont représentées les 14 stations relatives à C06. La profondeur moyenne des stations est de 0.80 m (profondeur minimum : 0.35 m, maximum : 2.30 m). Pour chaque station, on a représenté le diagramme sectoriel relatif au substrat. On constate qu'il est majoritairement composé de sable. Pour 3 stations, la dalle est présente. Pour la station sous le vent de l'îlot, le substrat est aussi composé de coraux vivants et de débris coralliens. La taille des diagrammes est choisie proportionnelle à la densité des phanérogames (caractéristiques des herbiers). La moyenne des densités est de 4 (3.98). Cette densité correspond à un herbier dense.

En annexe 3.9, on a représenté les 9 stations correspondant à C07. La profondeur moyenne est de 0.65 m (profondeur minimum : 0.45 m, maximum : 0.95 m). Le substrat est là aussi constitué essentiellement de sable. La densité moyenne des phanérogames est de 3.6. Les herbiers sont donc moins denses que ceux identifiés par C06. Pour 2 stations (croix rouges), les phanérogames n'ont pas été observées. Pour l'une, c'est la couverture en algues brunes qui est dense. Pour l'autre, il n'y a pas de végétation, mais une densité en coraux petites branches importante.

Les stations relatives à la classe C08 sont au nombre de 5. Elles sont représentées en annexe 3.10. La profondeur moyenne est de 0.60 m (profondeur minimum : 0.50 m, maximum : 0.65 m). Le substrat est composé à 100 % de sable. La densité moyenne des phanérogames est de 4. Mais, contrairement aux deux classes précédentes, les zones d'herbier sont éparées. Elles ont des dimensions réduites, toujours inférieures à 10 m.

On dispose de 9 stations correspondant à la classe C09 (cf. annexe 3.11). La profondeur moyenne est de 0.75 m (profondeur minimum : 0.65 m, maximum : 0.85 m). Le substrat observé est en intégralité composé de sable. La couverture en phanérogames et algues est pratiquement nulle (sur 2 stations on a pu observer quelques phanérogames éparées, sur une station, quelques algues brunes et un petit massif de corail).

On peut résumer les résultats de la façon suivante :

- C06 : herbiers denses, étendus, sur fond sableux et champs de pâtés coralliens,
 - C07 : herbiers assez denses, étendus, sur fond sableux, algueraies,
 - C08 : herbiers peu denses, étendus, ou herbiers denses de taille réduite sur fond sableux
- Ces 3 classes sont visibles en annexe 3.12a, 3.12b et 3.12c, accompagnées d'un extrait de photographie montrant les différences de densité entre les classes.
- C09 : fonds sableux nus.

¹⁸ La valeur des profondeurs mesurée est corrigée pour être ramenée à la profondeur lors de la prise de vue de Landsat7.

¹⁹ Barque en aluminium, motorisée, avec faible tirant d'eau.

Pour la classe C10, les zones concernées sont les zones découvertes de sables et les toits de tôle des bâtiments.

Au niveau des deux zones situées sur le platier mais identifiées dans la classe C03, les profondeurs sont de 0.70 m et 0.80 m. La densité en phanérogames est la plus forte observée. L'herbier est très dense et donc sombre (cf. annexe 3.12d).

3.1.3.3. Discussion

Les résultats fournis par l'observation sur le terrain ne viennent pas invalider le modèle proposé. Les classes C01 à C05, C09 et C10 semblent tout à fait pertinentes. Cependant, peut-être à cause du nombre trop peu conséquent d'observations sur le terrain, il ne se dégage pas un véritable critère discriminant entre les classes C06, C07 et C08. Les classes regroupent en effet plusieurs biotopes différents au regard des critères étudiés.

De plus, malgré l'augmentation du nombre de classes (de 7 à 10) entre les deux modèles, les herbiers très denses du platier restent classifiés avec les zones d'eau profondes de la classe C03. Il faut donc ajouter un critère de plus : la profondeur, pour faire la distinction entre les deux milieux.

Il faut de plus noter que même si l'image Landsat7 et l'observation terrain ont été réalisées au mois d'août, la première date de 1999 et la seconde de 2000. Or, les densités des herbiers varient au cours du temps [WBO94]. L'effet saisonnier est gommé. L'effet annuel ne l'est pas. Pendant l'année 1999, l'éclairement et la température ont été plus faibles qu'à l'ordinaire (phénomène climatique la Niña) et on peut supposer que la tailles et la densité des herbiers ont été affectées.

Le modèle Ilot Maître est valide mais son application doit se faire avec précaution.

3.1.3.4. Exportabilité du modèle

Puisque les règles de décision sont établies sur les codes numériques des bandes spectrales, on peut les exporter à une autre zone que celle où ces règles ont été établies.

Application du modèle Ilot Maître sur une zone similaire

Les règles de décision sont donc appliquées dans un premier temps sur une zone présentant des caractéristiques proches de celles de l'Ilot Maître. Le platier choisi est celui de l'Ilot Larégnère. Le résultat de la classification est présentée en annexe 3.13. La superposition des masques des classes sur la photographie aérienne de l'Ilot Larégnère montre une bonne correspondance classe-biotope. Dans le tableau 3.1, les surfaces de chacun des segments sont exprimées en pourcentage de la surface de totale de l'image et comparée à la surface des segments pour l'Ilot Maître.

Ilot Maître				Laregnère			
Classes	Segments	% de surface totale		Classes	Segment	% de surface totale	
C01	S2	20.08	14.20	C07	S28	0.17	0.00
	S3	0.15	0.17		S29	0.14	0.06
C02	S1	9.12	1.33		S32	0.16	0.00
	S8	0.74	0.00		S33	4.99	1.02
C03	S9	1.17	0.00		S34	0.87	0.00
	S10	8.67	4.32	C08	S21	0.06	0.00
C04	S4	10.86	37.13		S23	0.83	0.43
	S6	0.17	0.00		S25	0.14	1.98
	S14	3.58	5.74		S26	9.40	3.19
	S15	0.20	4.97		S27	0.76	0.08
C05	S5	0.15	3.73	S31	0.50	0.11	
	S7	1.03	3.40	C09	S13	0.00	0.00
	S11	0.15	0.03		S30	0.06	0.02
	S16	0.76	2.10		S36	0.25	0.02
	S17	5.53	3.13	C10	S35	0.13	0.00
C06	S12	0.39	0.20		S37	3.12	1.39
	S18	0.22	0.18	TOTAL	98.59	92.71	
	S19	12.23	3.14				
	S20	0.48	0.11				
	S22	1.15	0.39				
	S24	0.19	0.14				

tab. 3.1 – Surface (nombre de pixels) de chaque segments issus de la classification de la zone Larégnère par le modèle Ilot Maître.

On constate que 93 % de l'image Larégnère est classifié. Sur le platier, 90 % des pixels sont affectés dans les classes. En terme de quantité d'éléments classifiés, le modèle Ilot Maître est donc assez efficace sur la zone Larégnère.

On remarque dans le tableau 3.1 que certains segments sont vides. Ils identifiaient donc des pixels dont les propriétés spectrales étaient caractéristiques de l'Ilot Maître. Les segments contenant le plus de pixels restent dominants dans leur classe respective, sauf dans la classe C05 où la distribution dans chaque segment est plus homogènes que pour la classe C05 de l'Ilot Maître.

Application du modèle sur le grand récif

On peut également appliquer les règles de décision sur une zone où le milieu est différent. La zone choisie est située sur le récif barrière Aboré. Le résultat de la classification est présentée en annexe 3.14a et 3.14b. En calculant le nombre de pixels par classe et segment, on peut voir que 94 % de l'image est classifié. Cependant, si on se limite au récif, le pourcentage chute à 81 % : les pixels appartenant aux zones profondes sont quasiment tous affectés dans une classe ; au contraire, sur le récif, de nombreux pixels ne sont pas classifiés.

Le modèle Ilot Maître est donc insuffisant pour l'identification des biotopes sur la grandes barrières de corail.

Application du modèle Ilot Maître sur des zones profondes

On teste ici la sensibilité du modèle pour les zones de profondeur importante. Le site choisi est le récif du Prony. Ce récif est constitué, dans sa partie nord, d'un panache sableux de plus de 3 km. On dispose des données bathymétriques sur la zone avec lesquelles on construit un modèle numérique. En annexe 3.15, on peut comparer les résultats donnés par le modèle Ilot Maître (3.15a) et les résultats du modèle numérique bathymétrique (3.15b). On constate que le modèle Ilot Maître rend bien compte de la forme général du banc de sable (profondeur moyenne : 7 m). Le modèle met également en évidence le fossé situé à l'est du banc.

Cependant, il reste assez peu informatif sur la profondeur : dans la classe C04, par exemple, les profondeurs sont extrêmement variables (cf. figure 3.4).

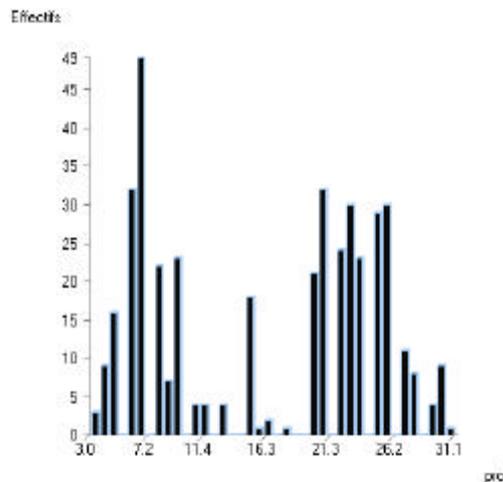


fig. 3.4 – Bathymétrie pour la classe C04

De plus, dans le fossé à l'est du banc, la classe C04 est quasiment absente alors que la profondeur est d'environ 22 mètres.

Cependant, la classe C04 n'est pas distribuée de façon aléatoire dans l'espace et semble donc rendre compte d'une réalité. Il est probable que le modèle mette en évidence les différences de substrat ou de turbidité pour des zones de profondeur homogènes. Cette hypothèse reste à vérifier.

3.1.3.5. Fabrication d'un modèle adapté à toute zone du lagon sud-ouest

Pour avoir à disposition un outil valable sur n'importe quelle zone du lagon, on construit un modèle global. Les deux intérêts principaux sont les suivants :

- on n'est pas obligé pour chaque nouvelle zone à classifier de reconstruire un modèle de classification : cette manipulation est en effet assez longue²⁰.
- un modèle global permet de comparer les zones classifier entre elles.

Afin de ne pas avoir à traiter une quantité d'information trop importante, le traitement statistique s'effectue sur les codes numériques de plusieurs zones jugées comme caractéristiques du lagon sud-ouest et non pas sur tout le lagon (cf. annexe 3.16). Ont été sélectionnées des zones de récif, de haut-fond, de platier, d'eau profonde, de fond de baie. L'échantillon total représente environ 200000 pixels. Le nombre de classes optimales est de 11. La segmentation fournit 68 segments. On en garde 39²¹. On nomme le nouveau modèle : modèle global.

On applique le modèle sur la zone Ilot Maître. Le résultat de la classification est donné en annexe 3.17. On peut calculer que 96.6 % des pixels de la zone sont classifiés, contre 98.6 % avec le modèle précédent, ce qui reste tout à fait correct. On constate que les classes correspondant à l'eau profonde sont beaucoup plus distinctes les unes des autres. Sur le platier, on retrouve quasiment les mêmes zones que dans le modèle précédent. Cependant, la classe C10 identifiant le sable a été divisée en deux sous-classes : K08 et K11. L'une concerne les fonds sableux dans environ 0.8 m d'eau, l'autre dans 0.2 m. De plus, une grande partie de

²⁰ On peut compter environ 3 heures de travail pour : 1- extraire les codes numériques de la zone, 2- leur soumettre le traitement statistique pour l'établissement des règles de décision, 3- la préparation des macro-commandes d'application du modèle dans SAVANE.

²¹ On considère un segment comme significatif lorsque :
 (% de l'effectif du segment dans sa classe) x (% de l'effectif du segments parmi l'ensemble des segments)
 > 0.07.

l'îlot est classée dans K08. Dans le modèle précédent, il y avait une distinction beaucoup plus claire entre l'immérgé et l'émergé. Enfin, le segment 11 de la classe K03 permet de classer les herbiers très denses (cf. annexe 3.18) ; ce n'était pas le cas dans le modèle précédent.

Sur le récif barrière Aboré, le modèle global est beaucoup plus efficace que le précédent : il permet de classer plus de 99 % de l'image (cf. annexe 3.14). Le récif est entièrement classifié. K04, K07 et K10 le divisent en 3 zones. Cette classification est à mettre en rapport avec la structure du récif. Du large vers l'intérieur du lagon, on observe les structures suivantes (cf. figure 3.5) :

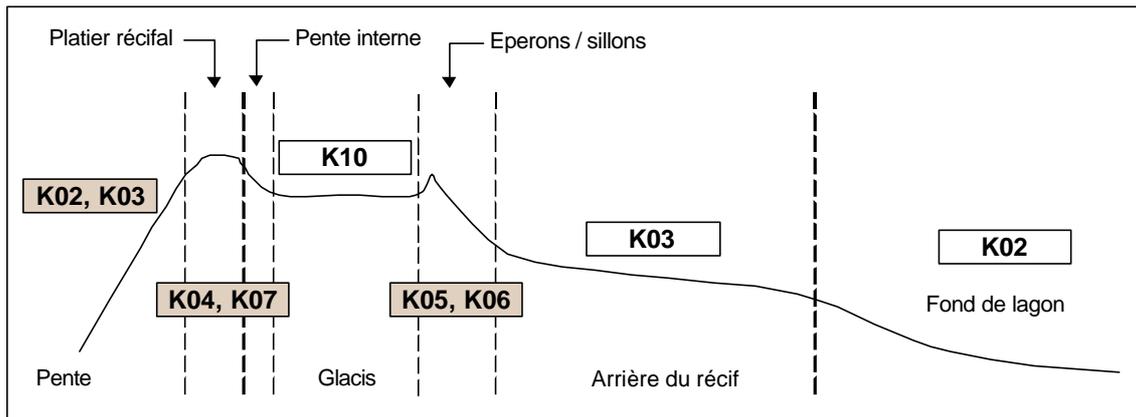


fig. 3.5 – Profil de barrière récifale et classes associées

K04, K07 et K10, qui correspondent respectivement à C06, C07 et C08, n'identifient pas ici des zones en herbiers mais des zones composées d'algues calcaires et de coraux vivants et morts.

Les règles de décision du modèle global sont exposées en annexe 3.20. Elles sont accompagnées des milieux correspondant sur l'Îlot Maître et sur la zone Aboré.

Les herbiers (autres que très denses) et les zones coralliennes ne sont pas discriminés. En terme de réponse spectral dans le visible et le proche infra-rouge, ces deux biotopes sont trop similaires pour être identifiés à part l'un de l'autre par le modèle global. Néanmoins, une connaissance (même théorique) de la zone classifiée suffit à faire la distinction.

4. DISCUSSION

Au-delà des possibilités de repérage de biotopes sur une vaste zone²² et souvent sur des zones difficilement accessibles (barrières de corail, platiers), la méthode d'établissement d'un modèle d'identification de biotopes couplés au SIG présente d'autres intérêts dans son principe et dans ses résultats.

4.1. INTERETS DE LA METHODE

41.1. Une exploration des données qui facilite l'interprétation des classes

L'analyse du jeu de données par Analyse en Composante Principale amène à l'identification des classes sur les combinaisons linéaires des valeurs issues des 4 bandes spectrales des pixels (cf. matériel et méthodes). Ces combinaisons linéaires sont indépendantes entre elles. Elles sont issues des axes factoriels expliquant la variabilité du jeu de données. La méthode factorielle est recommandée avant une classification car elle permet de montrer l'importance de certaines tendances ou de facteurs latents continus. Elle peut de plus mettre en avant des facteurs latents inattendus [LEB95]. La connaissance de la structure des données ainsi obtenue permet une meilleure interprétation de la classification réalisée.

Par exemple, sur les zones du lagon sud-ouest, l'ACP fournit toujours un axe factoriel relatif à la bathymétrie (premier axe), opposant d'un côté les objets de faibles profondeurs (codes numériques élevés) à ceux de profondeurs plus importantes (codes numériques faibles). L'ACP joue aussi un rôle de filtrage : le quatrième axe factoriel, a toujours été très peu explicatif de la variabilité et abandonné (car représentatif du bruit) pour effectuer la classification seulement sur les 3 premiers axes.

L'utilisation d'un algorithme implémenté dans un logiciel de télédétection (ex : ISODATA dans Erdas IMAGINE 8.3.1) ne révèle pas ce genre de renseignement. Les règles de la classification réalisée restent donc inconnues. On en connaît que le résultat.

41.2. Indépendance des classes par rapport à la zone classifiée

Dans la mesure où le modèle global a été construit pour déterminer des signatures pures des biotopes et non pas dans le but d'une classification exhaustive des zones lagunaires, les classifications réalisées sont pratiquement indépendantes des zones classifiées. En effet, les seuils des règles d'affectation des pixels dans les classes sont fixés *a priori*. Si sur deux images classifiées, on observe des zones mises en évidence par la même classe, on peut dire que, spectralement, les zones représentent une même réalité sur le terrain. On peut rapidement savoir si le biotope identifié est le même dans les deux cas en soumettant les résultats de la classification à un thématicien ayant une connaissance générale du lagon (ex : distinction entre zones d'herbiers et zones coralliennes en fonction de la localisation).

Au contraire, l'utilisation d'une méthode de classification utilisant un logiciel de télédétection fournit une classification totale des morceaux d'image étudiée, mais, les seuils de discrimination des classes sont établis à chaque fois à partir de la valeur des codes numériques des pixels de l'image classifiée. La comparaison de deux classifications effectuées sur des zones différentes est donc plus difficile, les deux images n'ayant pas les mêmes seuils de discrimination entre leurs classes. Il est donc également plus difficile de parler d'identification de biotopes.

²² les clichés Landsat7 couvrent l'intégralité du lagon calédonien et de nombreux autres lagons dans le Pacifique et dans d'autres océans.

41..3. Un outil pour la quantification des ressources lagunaires

Une espèce est associée à un habitat. Le repérage des différents biotopes lagunaires peut donc permettre :

- de localiser une espèce donnée si on connaît clairement son biotope,
- d'évaluer la biomasse de cette espèce si on connaît sa densité moyenne et le poids moyen des individus : il suffit de calculer la surface du biotope pour en déduire la biomasse de l'espèce.

On a estimé par exemple que sur un fond dur, la densité des *Trochus niloticus* (Troca) est d'environ 17.6 individus pour 1000 m² en moyenne sur le lagon [WBO92]. Sur toute zone où on peut repérer des fonds durs (coralliens), on pourra donc obtenir une estimation de la quantité de Trocas par calcul de la surface. SAVANE permet cette opération. La taille moyenne des Trocas pouvant également être évaluée, on peut déduire la quantité de nacre potentiellement exploitable. Les Trocas sont en effet utilisés dans l'industrie artisanale pour la fabrication de boutons.

41..4. Un outil de suivi des biotopes moyennant amélioration du modèle

En appliquant le modèle numérique sur des images identiques mais pris à des dates différentes, on peut étudier l'évolution d'un biotope dans le temps. En supposant que l'on puisse paramétrer le modèle en fonction des conditions de marée, de vent, etc. (ce qui n'est pas le cas actuellement), un changement de réponse spectrale du biotope entre les deux clichés signifiera un changement d'état. L'évolution de la surface du biotope pourra aussi être étudiée. Le modèle global construit n'a pas été testé sur une image Landsat7 d'une autre date. Il serait intéressant de réaliser cette opération pour se rendre compte de la sensibilité du modèle et des différences en matière de codes numériques des pixels entre les deux clichés.

4.2.LIMITES

La méthodes de classification couplée au SIG comporte néanmoins des limites que l'on peut relier à la finesse de l'information fournie par Landsat7.

42..1. Confusion entre différents biotopes et nécessité de la connaissance experte

4.2.1.1. A l'échelle des biotopes

On a constaté que les signatures spectrales des herbiers situés sur les platiers (eaux très peu profondes : de l'ordre du mètre) correspondent aux signatures des biotopes situés sur la barrière de corail (eaux très peu profondes et intermédiaires : supérieure au mètre). D'un point de vue écologique, les milieux identifiés sont fondamentalement différents. Au-delà du substrat et de la faune et flore fixées sur celui-ci (principal composant de la réponse spectrale avec la hauteur d'eau), c'est tout l'écosystème qui est différent entre ces deux milieux.

A ce niveau, et dans l'état actuel du développement de la méthode et des qualités informatives de Landsat7, une connaissance experte du lagon permet de faire la distinction entre les deux biotopes. Mais, cette connaissance n'est utilisable que sur des zones restreintes. En effet, elle devient difficilement applicable à l'échelle du lagon entier car elle n'est pas automatisable.

Un critère de discrimination de ces zones applicable de façon automatique après classification reste à déterminer.

4.2.1.2. A l'échelle du pixel

La taille d'un pixel sur une image Landsat7 est de 30 m de côté. Sur une telle surface, la réponse spectrale du sol n'est pas homogène. Néanmoins, le code numérique d'un pixel est le

résultat de l'intégration du signal sur l'ensemble de cette surface. L'information numérique fournit par un pixel peut donc s'avérer très différente de la réalité sur le terrain. Par exemple, on a vu, sur la zone Ilot Maître, qu'une classe identifie les herbiers qualifiés de clairsemés. En fait, sur le terrain, on a constaté que cette classe correspond à la fois à des herbiers homogènes avec une faible densité en phanérogames, et également à des zones d'herbiers denses mais épars. Ici, la connaissance experte est inutilisable. On touche aux limites des possibilités de télédétection de Landsat7.

42..2. Une méthode peu adaptée au grande profondeur

On a remarqué sur le récif du Prony que les classes déterminées par le modèle ne reflètent que très grossièrement la réalité bathymétrique. On peut dire que jusqu'à une profondeur d'environ 10 mètres, le modèle est capable de mettre en évidence les structures (banc de sable par exemple). La sensibilité à la nature du fond s'arrête quant à elle aux alentours de 2-3 mètres. L'eau a en effet un pouvoir tampon très important sur les radiations lumineuses. L'application du modèle global en vue de l'identification de biotopes doit donc s'effectuer sur des zones de faibles profondeurs. Une vérification de cette profondeur avant l'application du modèle est nécessaire pour éviter les confusions d'identification de biotopes et l'application du modèle sur une zone inadaptée.

Il serait intéressant d'utiliser un autre échantillonnage (cf. annexe 3.16) pour comparer le nouveau modèle ainsi construit à l'ancien. Un échantillonnage sur des zones profondes pourrait être réalisé. Son application permettrait de voir s'il est plus adapté pour les zones profondes que le modèle global. Néanmoins, le but est d'obtenir un modèle valable pour n'importe quelle zone, profonde ou pas. Il pourrait être intéressant, dans un but d'automatisation totale de la méthode (et en vue de son application sur d'autres lagons), de pratiquer un échantillonnage aléatoire sur l'ensemble du lagon sud-ouest et d'établir les règles d'affectation sur les codes numériques des pixels sélectionnés.

42..3. Le recoupement possibles des règles de décision

Dans l'élaboration du modèle global, les règles d'affectation des pixels dans les classes ont été établies à partir de zones échantillons. Ces zones ont été choisies de façon raisonnée et finalement destinées à la classification de zones similaires aux échantillons.

L'application du modèle sur le récif du Prony a montré qu'il pouvait y avoir recouvrement entre les segments : certains pixels correspondants à des profondeurs d'environ 15 mètres se retrouvent dans deux segments différents appartenant à deux classes différentes (segment 8 et 6). Les segments sont décrits ci-dessous :

SEGMENT6

bande bleue	78 et bande bleue	249
bande verte	57 et bande verte	63
bande jaune/rouge	2 et bande jaune/rouge	74
bande PIR	2 et bande PIR	65

SEGMENT8

bande bleue	78 et bande bleue	87
bande verte	57 et bande verte	63
bande jaune/rouge	2 et bande jaune/rouge	74
bande PIR	2 et bande PIR	135

On constate que les seuils minima sont identiques. Le segment 6 englobe le segment 8. Ce recouvrement pourrait s'avérer gênant s'il concernait des segments relatifs à des biotopes bien déterminés. Néanmoins, dans notre cas, ce sont les seuls segments (sur un total de 39) pour lesquels on constate ce recouvrement sur le récif de Prony. Sur les autres zones, aucun recouvrement n'a été constaté.

5. CONCLUSION

Mon travail au sein du programme ECOTROPE a permis la mise en place des méthodes et des chaînes de traitement nécessaires à l'utilisation des images Landsat7 ETM+ couplées au SIG SAVANE en vue de l'identification de biotopes lagunaires. Il ressort de cette étude que la méthode statistique appliquée simultanément sur les 4 premières bandes spectrales donne la possibilité d'identifier par classification les biotopes des petits fonds (profondeur inférieur à 2 m). Le couplage SIG rend possible la comparaison des classes obtenues avec les données de terrain disponibles. Le modèle ainsi construit permet de distinguer les herbiers selon leur densité en phanérogames, les fonds sableux nus, les zones coralliennes. Cependant, il subsiste des confusions : herbiers de platiers et coraux de récifs se retrouvent dans les mêmes classes. L'intervention d'une connaissance experte du lagon est alors indispensable pour différencier ces habitats en fonction de leur localisation. Le calcul des tailles des habitats identifiés peut se faire sur SIG. Avec plusieurs clichés Landsat, il serait probablement possible de suivre leur évolution dans le temps. A ce niveau, le modèle devra certainement être paramétré pour tenir compte des différences de conditions pendant les prises de vue du satellite (marée, vent ; turbidité, etc.). Enfin, si l'on connaît la relation habitat/population (en terme de densité ou biomasse par exemple), le modèle peut être utile pour évaluer les ressources halieutiques lagunaires.

BIBLIOGRAPHIE

[AND00] ANDREFOUET S., CLAEREBOUDT M., Objective class definitions using correlation of similarities between remotely sensed and environmental data, International Journal of Remote Sensing, volume 21, n°9, pp 1925-1930, 2000.

[BAT75] BATTISTINI R. *et alii*, Eléments de terminologie récifale indopacifique. Théthys, 7 (1), pp 1-111, fig 1-77, 1975.

[BOU99] BOUVET G., Analyse et description du système d'information du programme ECOTROPE, IRD de Nouméa, document interne IRD, septembre 1999.

[CAL98] CALMON O., Utilisation du système Roxann dans la cartographie des fonds d'une baie en milieu lagunaire, centre ORSTOM de Nouméa, septembre 1998.

[CUQ96] CUQ F., GOURMELON F., Conditions d'intégration des données au sein de bases d'information géographique, Revue internationale de géomatique, volume 6, n°4, 1996.

[FER00] FERRARIS J., BOUVET G., Couplage SIG / Télédétection / Analyse de données pour l'étude de l'environnement récifo-lagunaire – Application au lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie, août 2000.

[FOR93] FORSTER B., BAIDE X., XINGWEI S., Satellite remote sensing of pollution and its distribution in near-coastal waters, Asian Pacific remote sensing journal, volume 6, n°1, juillet 1993.

[GAS99] GASH J., ARVIDSON T., GOWARD S.N., ANDREFOUET S., HU C., MULLER-KARGER F.E., An assessment of Landsat 7/ETM+ coverage of coral reefs worldwide

[HAB00] HABERT Elisabeth, Savateca version 7.0 : manuel et documentation, IRD de Bondy, version provisoire de janvier 2000.

[HAB00] HABERT Elisabeth, Savedit version 7.0 : manuel et documentation, IRD de Bondy, version provisoire d'avril 2000.

[HAB00] HABERT Elisabeth, Savamer version 7.0 : manuel et documentation, IRD de Bondy, version provisoire de janvier 2000.

[HEN89] HENGEL P., Thematical Studies of Shallows in the Great Barrier Reef, Asian Pacific remote sensing journal, volume 1, n°2, Janvier 1989.

[JUP85] JUPP David L.B., MAYO K.K., KUCHLER D., HEGGEN S.J., KENDALL S.W., RADKE B.M., AYLING T., Landsat based interpretation of the cairns section of the Great Barrier Reef Marine Park, Natural Resources Series n°4, Division of Water and Land Resources, Institute of Biological Resources, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia, 1985.

[JUP86] JUPP David L.B., The application and potential of remote sensing in the Great Barrier Reef region, Great Barrier Reef Marine Park Authority, Research Publication, 1986.

[KUC86] KUCHLER D. A., Reef cover and zonation classification system for use with remotely sensed Great Reef data, Great Barrier Reef Marine Park Authority, Technical Memorandum GBRMPA-TM-7, juin 198-.

[KUC87] KUCHLER D. A., Geomorphological separability, Landsat MSS and aerial photographic data : Heron Island, Great Barrier Reef, Great Barrier Reef Marine Park Authority, Technical Memorandum GBRMPA-TM-10, mars 1987.

[LEB95] LEBART L., MORINEAU A., PIRON M., Statistique exploratoire multidimensionnelle, Dunod, Paris, 1995.

[MAR89] The Marine Environmental Assessment Division, NESDIS, NOAA, Satellite imagery applications to coastal marine resources, Asian Pacific remote sensing journal, volume 1, n°2, Janvier 1989.

- [MUM97a] MUMBY P.J., GREEN E.P., EDWARDS A.J., CLARK C.D., Coral reef habitat mapping : how much detail can remote sensing provide ?, Marine Biology (1997) 130 : 193-202.
- [MUM97b] MUMBY P.J., GREEN E.P., EDWARDS A.J., and CLARK C.D., Measurement of seagrass standing crop using satellite and digital airborne remote sensing, Marine Ecology Progress Series, vol. 159, pp. 51-60, 1997.
- [MUM98] MUMBY P.J., GREEN E.P., CLARK C.D., EDWARDS A.J., Digital analysis of multispectral airborne imagery of coral reefs, Coral Reefs (1998) 17:59-69.
- [NIC95] NICHOL J., GOH K. C., Remote sensing for marine environmental monitoring : a Singapore case study, Asian Pacific remote sensing journal, volume 7, n°2, janvier 1995.
- [OUI98a] OUILLON S., DURAND N., FORGET P., FIANDRINO A., FRAUNIE P., Remote sensing as a tool for suspended sediment transport modelling in coastal areas, Third International Conference on Multiphase Flow, ICMF'98, Lyon, France, 8-12 juin 1998.
- [OUI98b] OUILLON S., FORGET P., FROIDEMONT J-M., NAUDIN J-J., Estimating suspended matter concentrations from SPOT data and from field measurements in the Rhône river plume, MTS Journal, volume 31, n°2
- [PFO98] FORGET P., OUILLON S., Surface suspended matter off the Rhône river mouth from visible satellite imagery, Oceanologica Acta, volume 21, n°6, mars 1998.
- [PNE00] PNEC (Programme National "Environnement Côtier") - Formalisation d'indicateurs des écosystème récifo-lagonaires dans une perspective écologique, thème 2, Chantier Nouvelle-Calédonie, fichier informatique, 2000.
- [PUM99] PUMO B., Méthodes statistiques de classification appliquées en traitement d'images, polycopié, janvier 1999.
- [REN00] RENAUD Marie-Hélène, Rencontre avec la sixième dimension, notice explicative sur la base de données géographiques LagonNC du lagon sud-ouest de la nouvelle-Calédonie, fichier informatique, 10 février 2000.
- [THO99] THOLLOT P., Caractérisation des communautés marines et suivi des peuplements ichtyologiques des îlot du Parc du Lagon Sud placés en réserve, T & W Consultants, pp12, 43-54, avril 1999.
- [WBO86] BOUR W., LOUBERSAC L. RUAL P., Thematic mapping of reefs by processing of simulated SPOT satellite data : application to the Trochus niloticus biotope on Tetembia Reef (New-Caledonia), Marine Ecology – Progress series, volume 34, pp 243-249, 19 décembre 1986.
- [WBO92] BOUR W., Un mollusque nacrier du Pacifique – biologie, écologie et gestion rationnelle du Troca (Trochus niloticus L.) de Nouvelle-Calédonie, ORSTOM éditions, collection Etudes et thèses, Paris 1992.
- [WBO94] BOUR W., JOANNOT P., Milieux côtiers du Grand Nouméa, Etude des biotopes récifaux du parc marin de Nouméa – Cartes thématiques des platiers récifaux des réserves marines au large de Nouméa, document interne, 1994.
- [WBO96] BOUR W., DUPONT S., JOANNOT P., Establishing a "SPOT" thematic neo-channel for the study of hard-of-access environments : example of Application on the growth areas of the New Caledonian reefs, Geocarto International, volume 11, n°1, mars 1996.
- [WBO97] BOUR W., PICHON M., Discrimination of scleractinian-dominated from other reef communities using spot satellite imagery, Proc. 8th International Coral Reef Symposium 2, pp 1487-1490, 1997.

[WBO98] BOUR W., Vade-mecum pour la cartographie des Madrépores vivants par la méthode de l'indice corallien, document interne IRD, avril 1998.

[ZHA99] ZHANG M., CARDER K., MULLER-KARGER F.E., LEE Z., GOLDFOF D.B., Noise reduction and atmospheric correction for coastal applications of Landsat Thematic Mapper imagery, *Remote Sensing Environment* (1999) 70: 167-180.

Documentation Internet

[www1] http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html, 14/04/2000.
On peut y consulter la documentation concernant le satellite Landsat 7.

[www2] <http://www.spotimage.fr/accueil/news/price/welcome.htm>
Ce site est celui de SPOT image.

[www3] <http://edcwww.cr.usgs.gov/landaac/convert/hdfconvert.html>
Ce site de la Nasa permet la visualisation de Quicklook des différentes zones photographiées par le satellite Landsat 7. On peut y commander les clichés que l'on désire.

[www4] <http://lmms.external.lmco.com/remospasci/landsat.html>
Constructeurs de L7, description du satellite

[www5] <http://noumea/>
Documentation sur l'IRD et le LATICAL.

[www6] http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/landsat/campaign_docs/documentation/ias_readme.html
Traitement d'image Landsat : passage du niveau L0R au niveau L1G.

[www7] <http://www.gbrmpa.gov.au/>
Site du Great Barrier Reef Marine Park Authority, PO Box 1379, Townsville Qld 4810, Australia.

[www8] <http://www.geog.ubc.ca/courses/klink/g472/class98/hamren-larsson/bath1.htm>
Méthode permettant d'obtenir la bathymétrie à partir d'image Landsat. Algorithmes.

[www9] <http://www.pcigeomatics.com/cgi-bin/pcihlp/ISOCLUS|ALGORITHM>
Description de l'algorithme ISODATA.

[www10] <http://neural.cs.nthu.edu.tw/jang/courses/cs4601/pr/>
Introduction à la reconnaissance de forme, 6/11/1997. Présentation de l'algorithme K-means et Isodata.

ANNEXE

Dictionnaire S0

OrgEco9798metab

Points de suivi des organismes végétaux dans le cadre d'ECOTROPE
Données de métabolisme

Type : Description des attributs

Nombre d'attributs : 52

station : 01

Date d'observation : de 24/11/97 au 30/05/99

Territoire couvert : Lagon sud-ouest - concentration des points vers l'ouest

Technique de localisation : GPS

Précision : 0,1 mètre

Géométrie : Longueur côté haut gauche ;
Latitude côté haut gauche ;
Longitude côté bas droit ;
Latitude côté bas droit ;

Ellipsoïde : International 1974

Projection : UTM

Nom du fichier origine :

Description et remarques : Points de suivi des organismes végétaux dans le cadre d'ECOTROPE
Données de métabolisme

Qualité de l'information : Les données de sédimentologie sont approximatives

Nom de la fiche SBP : Nom de la fiche

Source du fichier : IRD Nouméa

Auteur : Claire Gargue

Fichiers d'origine : Metabeco.xls

Date d'intégration dans le SIG : 07/00 par : G. Bourrel

Relations / Attributs / Feuille

Feuille des relations

Lien hypertexte

Dictionnaire S0

OrgEco9798eco

1 Station : Numéro de la station

2 Jour : Jour de l'échantillonnage

3 Mois : Mois de l'échantillonnage

4 Année : Année de l'échantillonnage

5 Prof : Profondeur de la station mesurée avec le sonda ou bateau

6 %VAZE : Pourcentage de vase

7 SFIF : SFIF

8 Chla : Moyenne de chlorophylle A calculée sur 5 échantillons en mg de chl a/m³

9 Phae : Moyenne de phaeopigments calculés sur 5 échantillons en mg de phaeopigments/m³

10 %Chl a

11 N : Nombre de taxa, richesse spécifique

12 H' : Indice de diversité de Shannon calculé à partir des biomasses

13 E : Indice d'équabilité de Pielou calculé à partir des biomasses

14 PMSBC : Biomasse totale des microphytes exprimée en g de matière sèche sans cendre par m²

15 CYAN : Biomasse totale des cyanophycées exprimée en g de matière sèche sans cendre par m²

16 PHAN : Biomasse totale des algues calcaires exprimée en g de matière sèche sans cendre par m²

17 AM : Biomasse totale des algues molles exprimée en g de matière sèche sans cendre par m²

18 Maell : Chlorophyceae inact.

19 P51

20 P52

21 P53

22 P54

23 P55

24 P56

25 P57

26 P58

27 P59

28 P60

29 P61

30 P62

Relations / Attributs / Feuille

Feuille des attributs

ANNEXE 2.1 - Description du dictionnaire de la base de données

ANNEXE 2.2a - Chaîne de traitement appliquée aux images Landsat 7 ETM+ en vue de leur intégration dans SAVANE

Acheter une image L7

- Se connecter au site de l'USGS : <http://edcwww.cr.usgs.gov/landaac/convert/hdfconvert.html>
- Suivre les instructions

Ouvrir les images L7

- Démarrer Erdas IMAGINE 8.3.1
- Insérer CD contenant les images
- Choisir *import/export* dans les menus
- Dans la fenêtre *import/export*
 - cocher *import*
 - choisir *generic binary* dans le menu déroulant
 - choisir *from CD*
 - sélectionner la bande à importer
 - nommer le fichier de sortie (output) : *bande1* pour la première bande, *bande2* pour la deuxième, etc.
- Dans la fenêtre d'importation
 - choisir *unsigned 16 bit*
 - cocher *swap bytes*
 - indiquer la largeur (l) et la hauteur (h) de l'image à importer²³
- Répéter l'opération pour les 9 bandes

Fabrication d'une image composite (utile pour l'étape suivante)

- Choisir *interpreter* dans les menus
- Choisir *utilities* dans la fenêtre *interpreter*
- Choisir *layer stack* dans la fenêtre *utilities*
- Sélectionner les bandes 1, 2, 3 et 4 en appuyant sur *add* entre chaque sélection²⁴
- Nommer le fichier de sortie qui contiendra les 4 bandes : *bande1234*

Préparation de l'image

- Masquer les nuages, les ombres des nuages, les zones terrestres²⁵ ;
 - choisir *band combination* dans le menu *raster*
 - jouer avec le contraste pour obtenir l'image la plus parlante pour mettre en évidence les objets à masquer²⁶
 - tracer les contours des objets à masquer avec un AOI²⁷ polygonal (menu *AOI tools*)
 - avec la boîte à outils *raster tools*, remplir les AOI (noir pour nuages et ombres ; blanc pour zones terrestres)
 - Attention : il faut sauvegarder les AOI créés. On ne peut afficher à l'écran que 3 bandes à la fois. Les bandes non affichées ne subissent pas les transformations effectuées avec les AOI. Il faut donc changer la distribution des bandes dans *band combination*, afficher à nouveau les AOI et les remplir.
- Extraire la zone d'intérêt à intégrer dans SAVANE
 - tracer un AOI rectangulaire sur la zone
 - sélectionner l'AOI tracé
 - choisir *inquire box* dans le menu *utility*
 - cliquer sur le bouton *fit to AOI* dans la fenêtre *inquire box*
 - choisir *subset image*
 - choisir l'image d'entrée : *bande1234* et nommer l'image de sortie : *bande1234_rectifiee*
 - faire de même pour les autres bandes

Exportation des bandes

- Sur l'image *bande1234_rectifiee*, choisir *band combination* et choisir d'afficher les 3 premières bandes

²³ Pour les bandes 1, 2, 3, 4, 5 et 7 : l = 6600, h = 6000 ; pour les bandes 6a et 6b : l = 3300, h = 3000 ; pour la bande 8 : l = 13200, h = 12000

²⁴ On ne peut pas construire d'image composite avec des images qui n'ont pas la même taille

²⁵ Se reporter au chapitre X.X.X pour plus d'information

²⁶ Par exemple pour les ombres, dans *band combination* : en *red* choisir *bande4*, en *green* choisir *bande2*, en *blue* choisir *bande1*. Dans *contrast*, choisir *equalize histogram*.

²⁷ AOI signifie Area Of Interest

- Choisir *view to img*. L'image est codée en 3 fois 8 bits.
- Nommer l'image *bande123*
- Choisir *import/export*

ANNEXE 2.2a - suite

- Cocher *export*
- Choisir le format *TIFF*
- Choisir *bande123* en *input*
- Nommer l'image *bande1* en output. L'image est codée en 8 bits.
- Choisir le répertoire destiné à recevoir l'image *bande1*
- Choisir le *canal 1* à exporter dans *option* de la fenêtre d'exportation
- Faire de même pour les bande 2 et 3
- Pour extraire la bande 4, refaire l'opération en choisissant à la première étape les bandes 1, 2 et 4 dans *band combination*

Transformation des images en format BMP pour l'importation dans Savane

- Ouvrir l'image *bande1* avec PaintShop Pro ou tout autre logiciel permettant cette opération
- Choisir *split to RVB*. On obtient 3 images identiques en niveaux de gris.
- Enregistrer sous le nom *bande1* l'une des 3 images générées avec le *split to RVB* sous format BMP dans le répertoire *d_digit* de la base SAVANE

Intégration dans SAVANE (cf. documentation Savamer)

ANNEXE 2.3a - Classification multivariée non-supervisée des biotopes avec SAVANE

- Afficher l'attribut LagonSO (composition colorée) de la relation FonPho99Landsat7
- Reconnaître sur l'image RVB la zone à classifier
- Zoomer sur la zone
- Choisir Macro enregistrer. La nommer Rech_37. La suite des opérations va être enregistrée.
- Pour un des segments identifiés par SPAD, choisir CRIS numérique formule et construire un attribut temporaire tel que :
(v[LagonSO_band1] >= min1 and v[LagonSO_band1] <= max1)
Les min1 et max1 étant déterminés par le logiciel SPAD
- Choisir "entier positif (255 valeurs maximum, de 1 à 255, codage 8 bits)"
- Choisir "étalement toutes les valeurs"²⁸
- nommer l'attribut temporaire : bande1_biotope
- faire de même pour les autres bandes spectrales avec min2 et max2, min3 et max3, min4 et max4
- Pour chaque attributs temporaires, choisir QUEST restreindre par formule et restreindre les attributs temporaires de la façon suivante :
v[bande1_biotope] = 255
- Choisir CRIS numérique formule et construire l'attribut temporaire tel que :
(v[bande1_biotope] = 255 and v[bande2_biotope] = 255 and ...)
- Le nommer b1234_biotope1sur37 (si le nombre total de segments est de 37)
- Choisir "entier positif 255 couleurs (codage 8 bits)"
- Choisir "ne pas étaler les valeurs"
- Choisir CLASS par intervalle sur l'attribut b1234_biotope1sur37
- Définir un intervalle de [1 ; 1.5[
- Nommer l'attribut : b1234_biotope1sur37_classif
- Choisir Macro Fin.

- Choisir Macro enregistrer. La nommer Mask_37
- Choisir TYPE vectoriser par zone sur l'attribut b1234_biotope1sur37_classif
- Nommer la relation réceptrice : C01sur37
- Choisir QUEST restreindre par valeur sur C01sur37
- Cliquer sur le bouton "suivant"
- Choisir la modalité correspondant à l'intérieur de la zone d'intérêt : 1 ; 1.5
- Choisir Mask Création sur objet.
- Choisir comme objet C01sur37
- Nommer le masque « prony_1sur27_maitre » (s'il s'agit d'une classification de la zone du récif du Prony avec le modèle Ilot Maître).
- Choisir Macro Fin.

Les deux macros construites sont consultables dans le répertoire de l'utilisateur, répertoire d_macro. Pour les ouvrir, utiliser WordPad.

Ci-dessous, une macro de recherche et une macro de masque.

Macro de recherche

```
LagonSO
CRIS_FORMULE
FonPhoLandsat7
0
1
v[LagonSO_band1] >= 1 and v[LagonSO_band1] <= 77
b1_biotope1sur37
sans description
FIN_CRIS_FORMULE
CRIS_FORMULE
FonPhoLandsat7
0
1
v[LagonSO_band2] >= 1 and v[LagonSO_band2] <= 249
b2_biotope1sur37
sans description
FIN_CRIS_FORMULE
CRIS_FORMULE
FonPhoLandsat7
0
1
```

²⁸ Si on choisit de ne pas étaler les valeurs, l'attribut temporaire bande1_biotope n'est pas affichable car regroupe à l'intérieur d'une même classe les valeurs répondant à l'inégalité ayant servi à la construction et les valeurs n'y répondant pas. Les pixels répondant à l'inégalité sont affectés de la valeur 255.

```

v[LagonSO_band3] >= 1 and v[LagonSO_band3] <= 18
b3_biotopelsur37

sans description
FIN_CRIS_FORMULE
CRIS_FORMULE
FonPhoLandsat7
0
1
v[LagonSO_band4] >= 1 and v[LagonSO_band4] <= 249
b4_biotopelsur37
sans description
FIN_CRIS_FORMULE
QUEST_SELECTION_FORMULE
FonPhoLandsat7
v[b1_biotopelsur37] = 255
FIN_QUEST_SELECTION_FORMULE
QUEST_SELECTION_FORMULE
FonPhoLandsat7
v[b2_biotopelsur37] = 255
FIN_QUEST_SELECTION_FORMULE
QUEST_SELECTION_FORMULE
FonPhoLandsat7
v[b3_biotopelsur37] = 255
FIN_QUEST_SELECTION_FORMULE
QUEST_SELECTION_FORMULE
FonPhoLandsat7
v[b4_biotopelsur37] = 255
FIN_QUEST_SELECTION_FORMULE
CRIS_FORMULE
FonPhoLandsat7
0
0
v[b1_biotopelsur37] = 255 and v[b3_biotopelsur37] = 255
b1234_biotopelsur37
sans description
FIN_CRIS_FORMULE
CLAS_INTERVALLES
FonPhoLandsat7
b1234_biotopelsur37
b1234_biotopelsur37_classif
sans description
0
2
1
1.000000
1.500000
FIN_CLAS_INTERVALLES
QUEST_SELECTION_NOMINALE
FonPhoLandsat7
b1234_biotopelsur37_classif
0
1
[ 1.00, 1.50[
FIN_QUEST_SELECTION_NOMINALE
FIN_MACRO

```

Macro de masque

```

LagonSO
TYPE_VECTEUR
FonPhoLandsat7
b1234_biotopelsur37_classif
0
1
C01sur37
FIN_TYPE_VECTEUR
QUEST_SELECTION_NOMINALE
C01sur37
b1234_biotopelsur37_
0
1
[ 1.00, 1.50[
FIN_QUEST_SELECTION_NOMINALE
MASQUE_CREATION
C01sur37
0.000000
prony_01sur37_maitre
FIN_MASQUE_CREATION
FIN_MACRO

```

Pour créer les masques correspondants aux autres segments, il faut modifier ces deux macros avec WordPad en ajoutant dans la macro de recherche du segment1 la macro de recherche du segment2, etc. De même dans la macro de masque.

On peut ensuite appliquer les deux macros, l'une à la suite de l'autre, sur la zone à classifier.

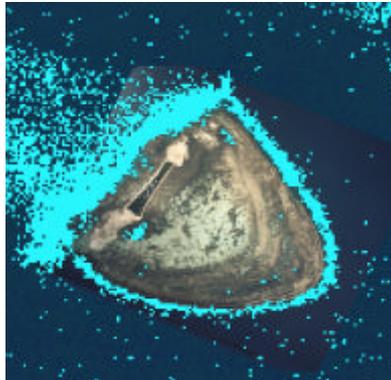
ATTENTION : une macro ne peut pas comporter plus de 31 recherches de segments (on atteint à ce niveau le nombre d'attributs temporaires maximum autorisé par SAVANE).

Pour effectuer une autre recherche (par exemple sur une autre zone ou avec d'autres segments), on peut dupliquer des macros déjà existantes et réutiliser leur architecture.

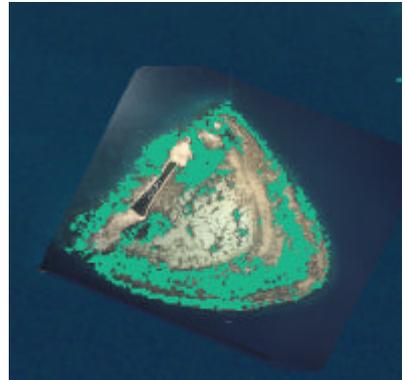
ANNEXE 3.1 - Ilot Maître : classification en 7 classes



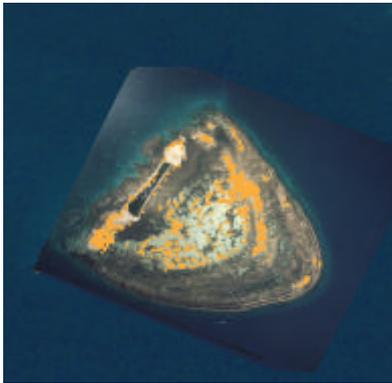
Classe 1



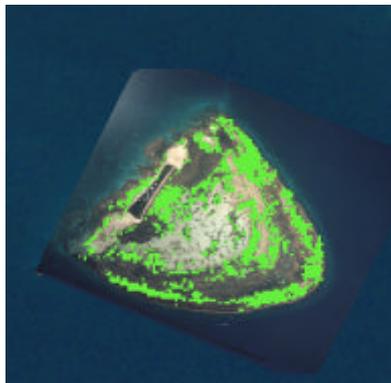
Classe 2



Classe 3



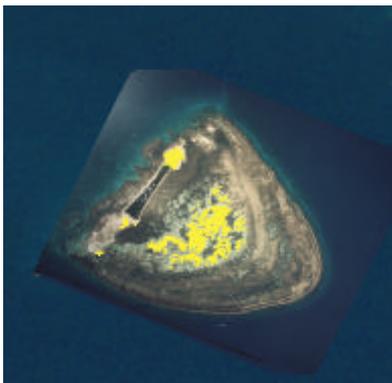
Classe 4



Classe 5

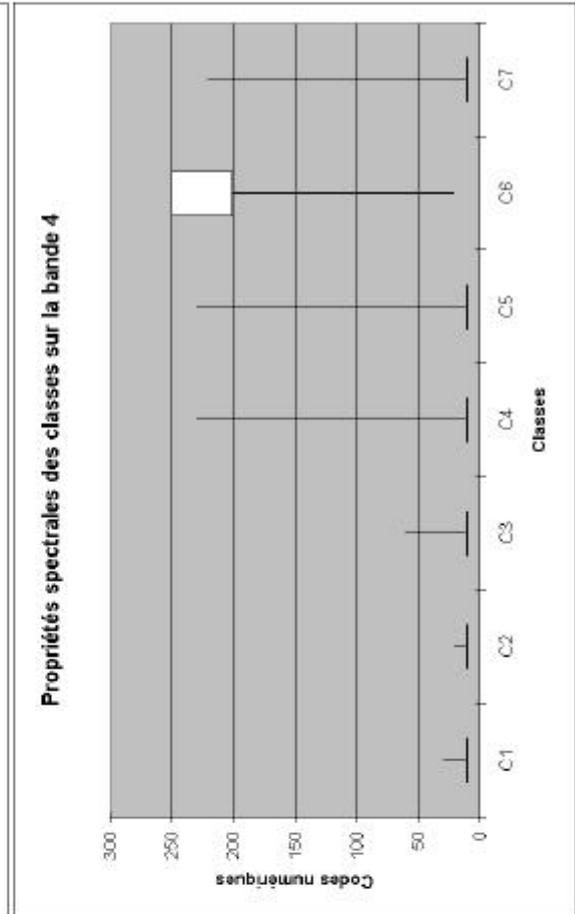
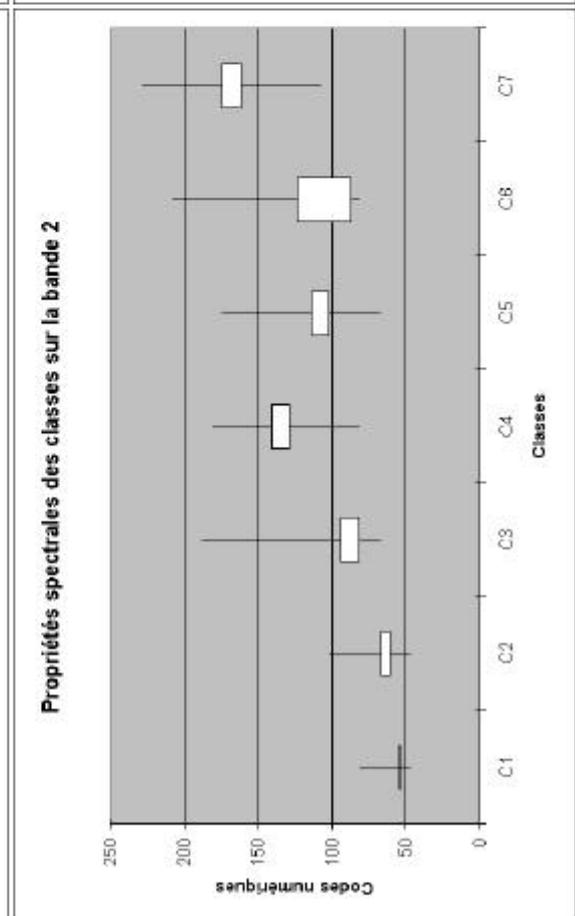
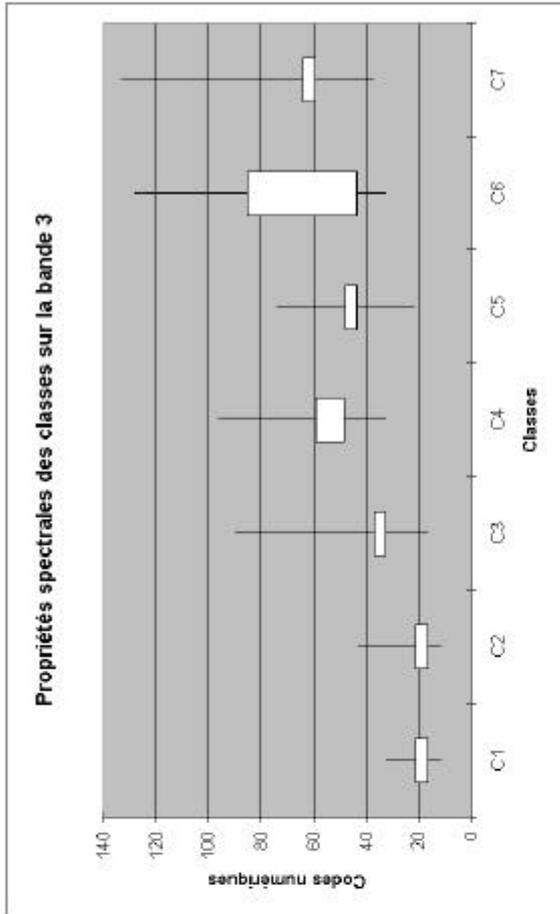
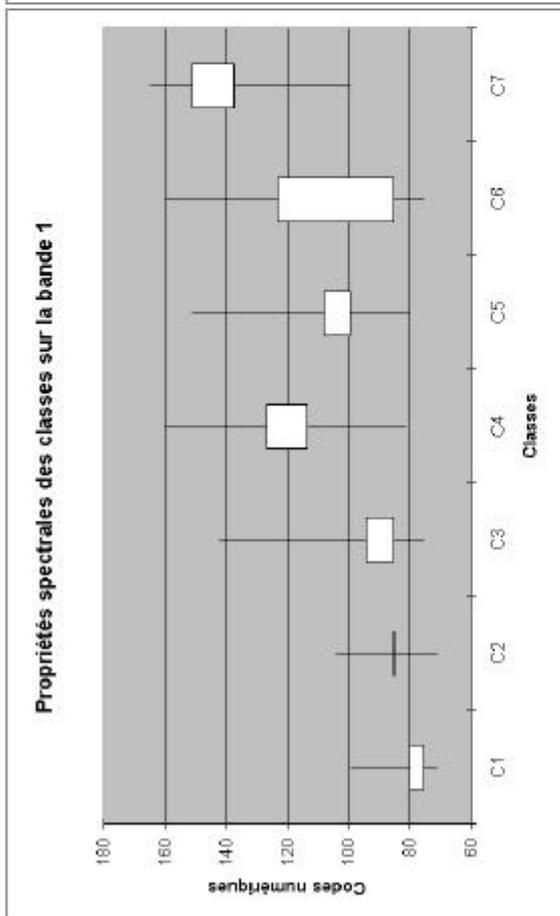


Classe 6

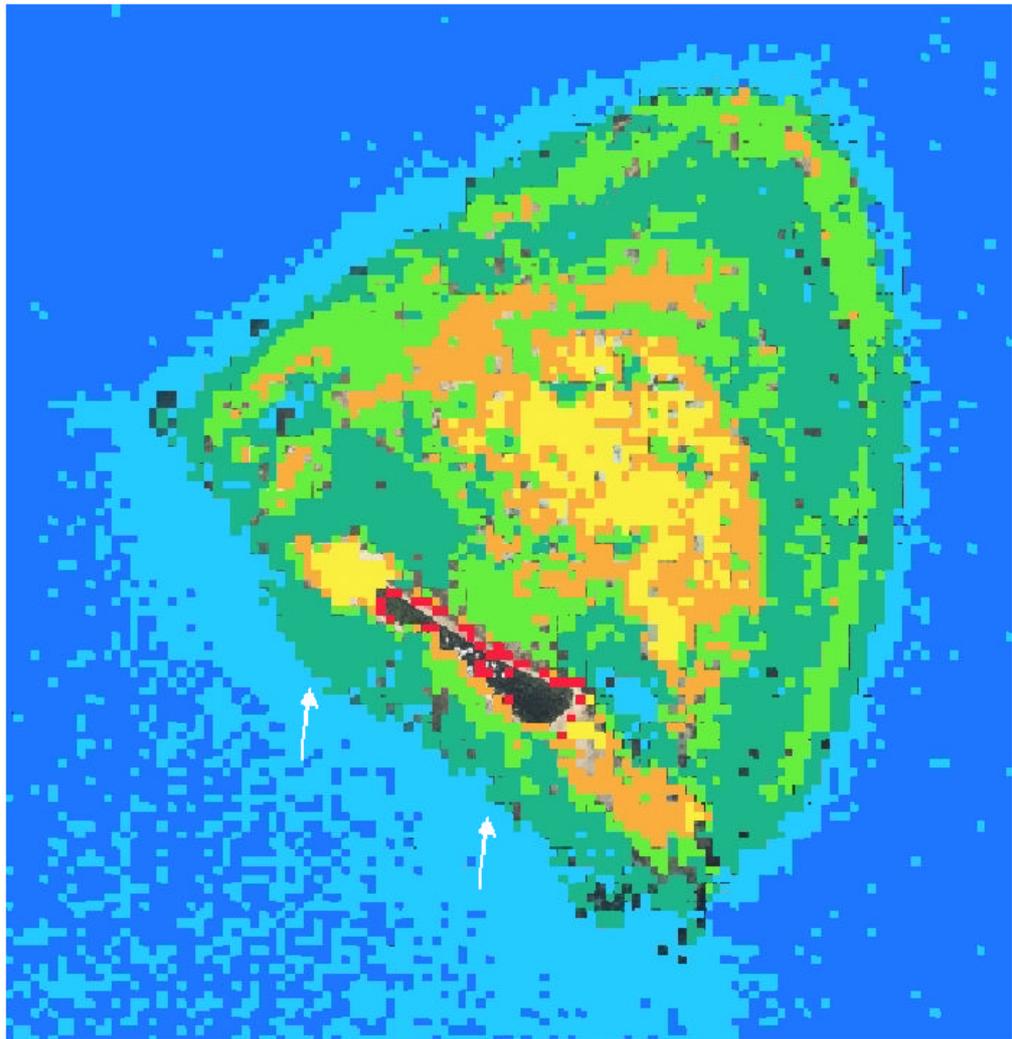


Classe 7

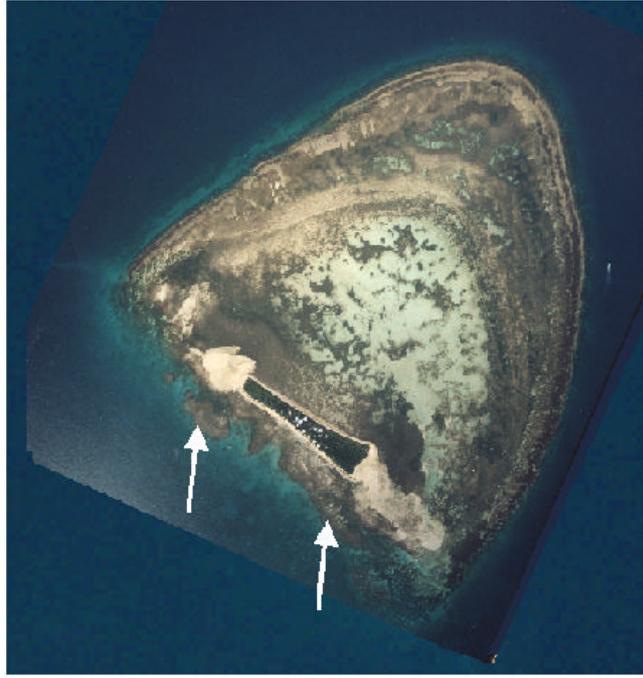
ANNEXE 3.2 - Boîtes de dispersion des 7 classes issues du premier modèle pour les 4 bandes spectrales



ANNEXE 3.3 - Zones non discriminées par le modèle à 7 classes

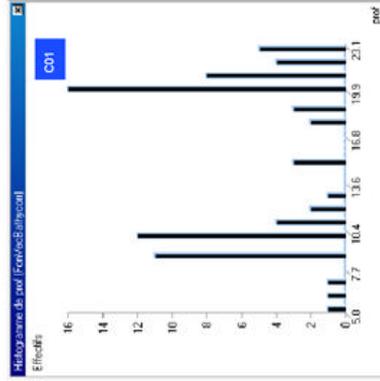
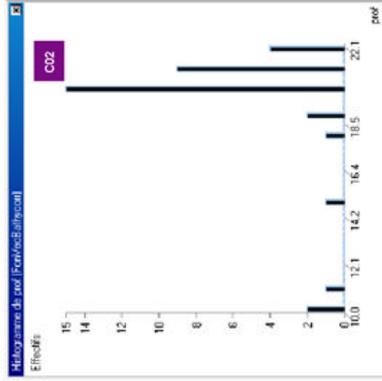
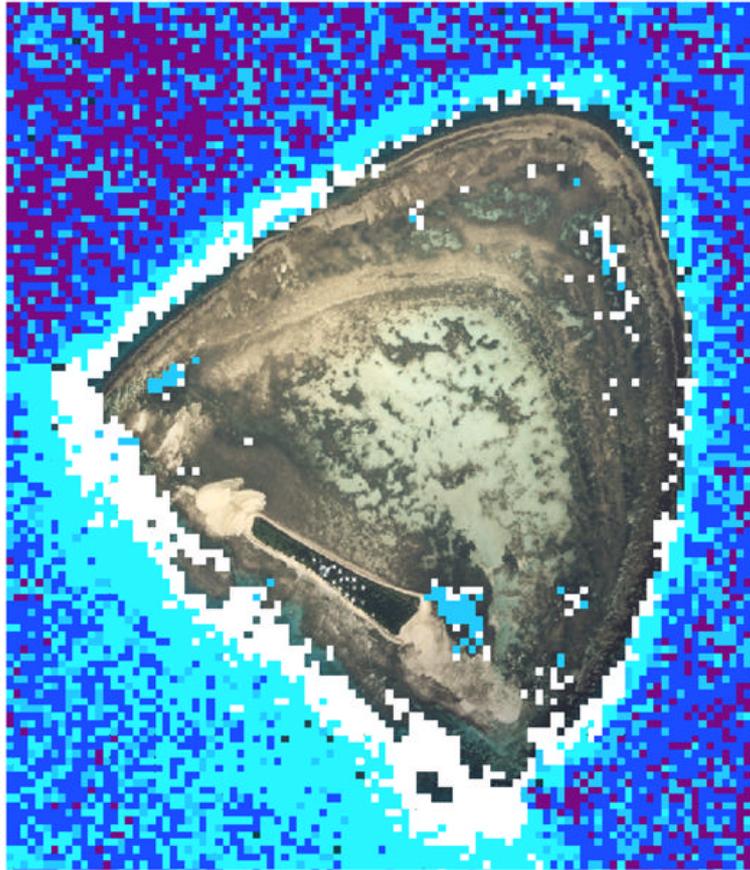
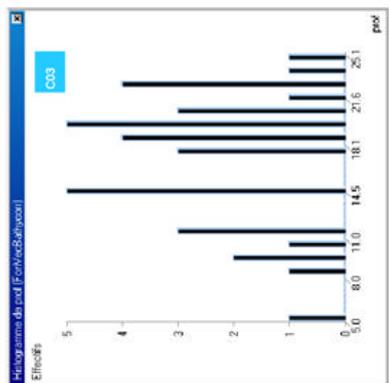
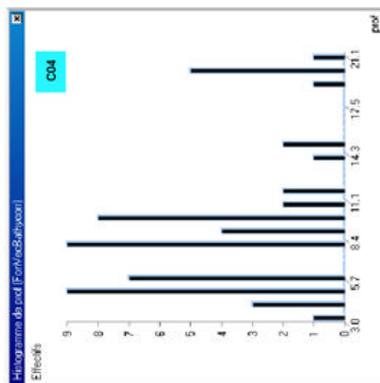
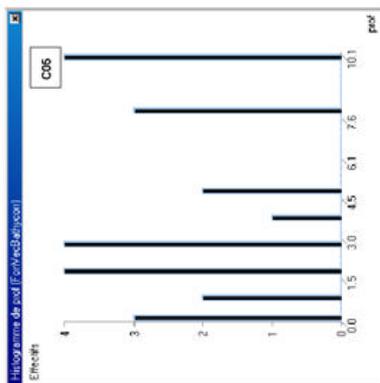


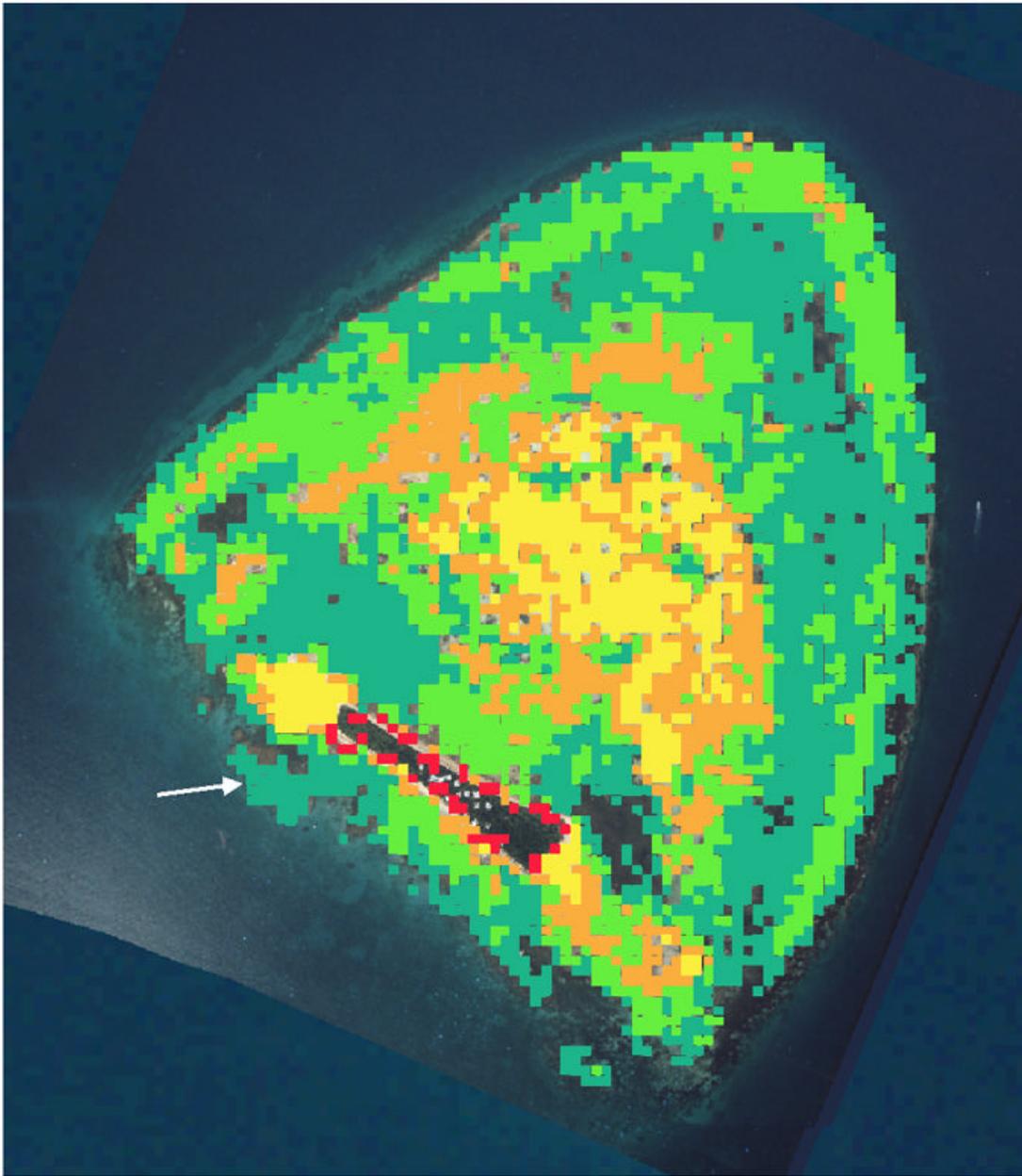
Ilot Maître - Photographie aérienne



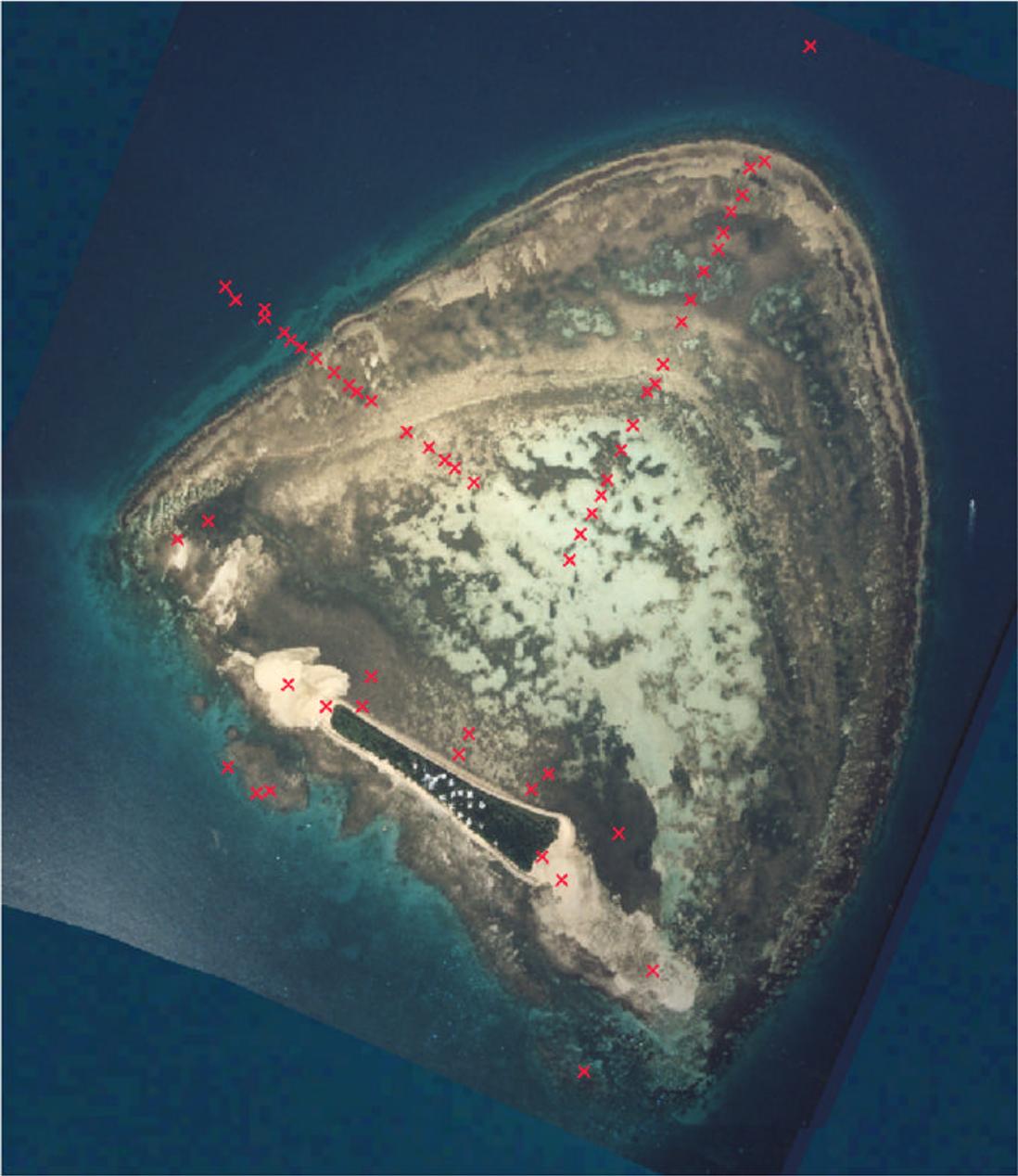
Ilot Maître - classification en 7 classes

ANNEXE 3.4 - 5 premières classes issues du modèle Ilot Maître





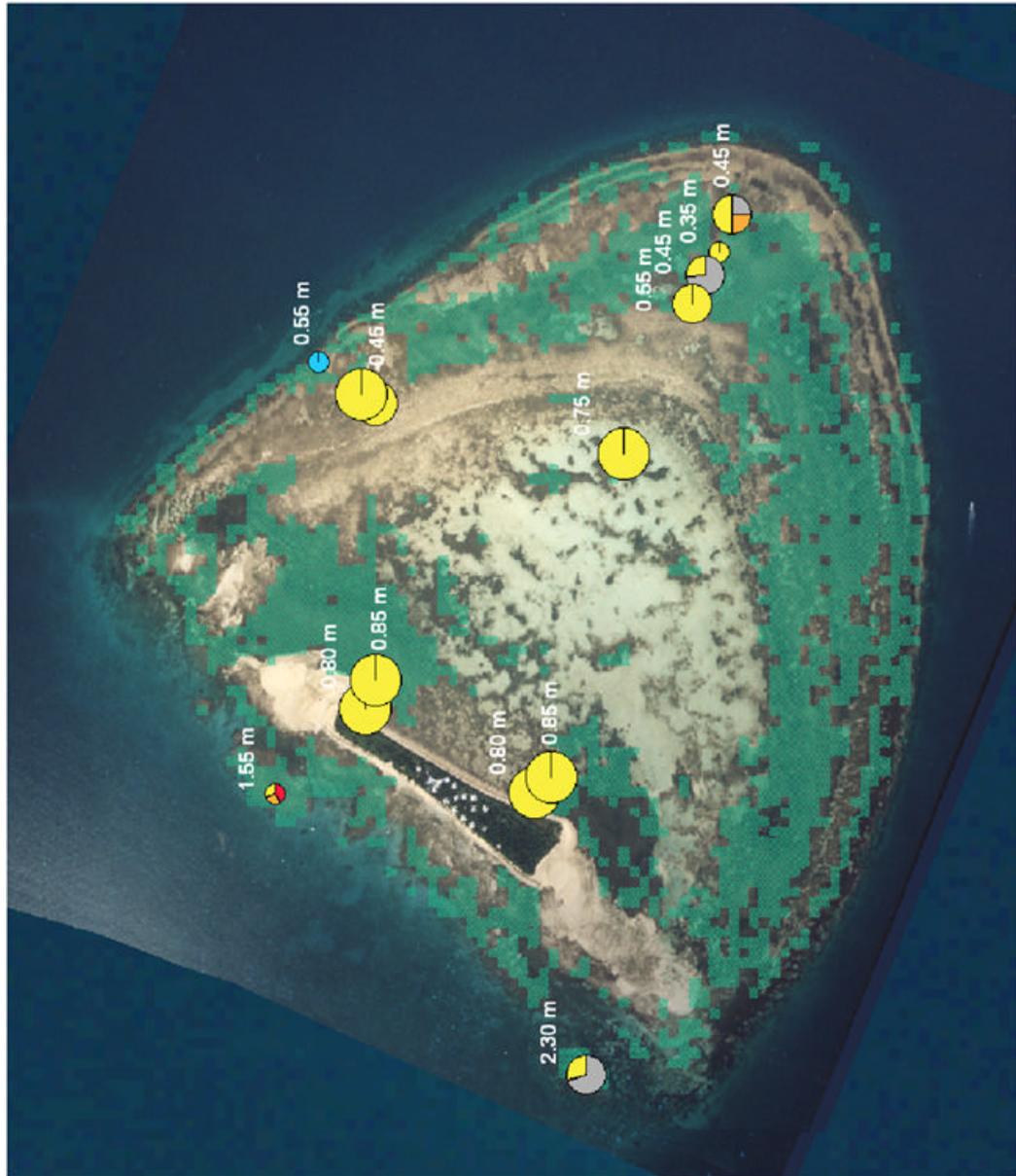
ANNEXE 3.5 - Classes du modèle Ilot Maître identifiant les zones de platier



ANNEXE 3.6 - Localisations des observations sur le terrain

ANNEXE 3.7 - Feuille d'observations sur le terrain

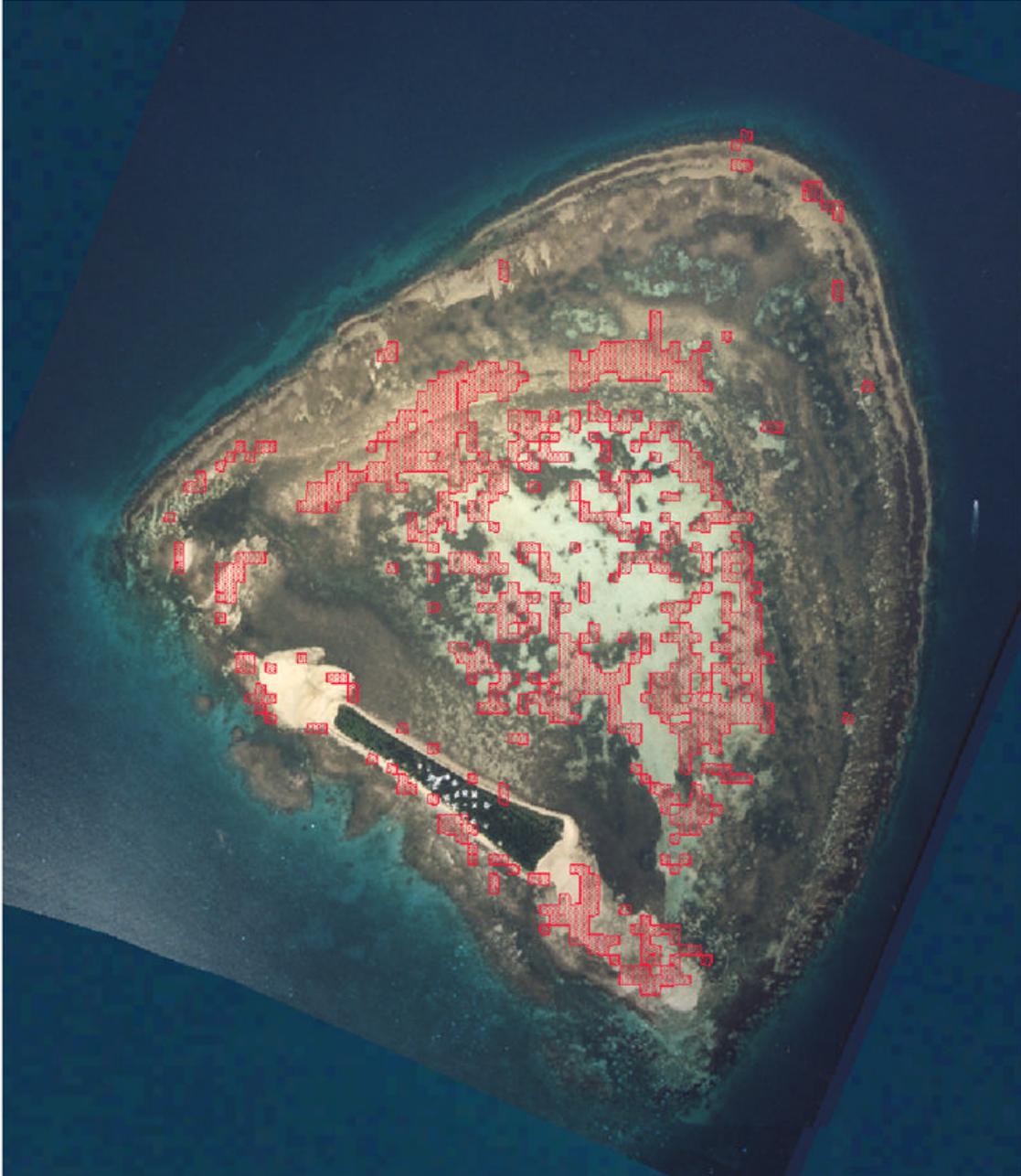
Info générales					
N°station					
Longitude GPS					
Latitude GPS					
Jour					
Heure					
Profondeur					
Remarques					
Substrat					
vase					
sable fin					
sable grossier					
gravier					
débris					
petit bloc					
gros bloc					
roche					
dalle					
corail substrat					
autres					
Flore					
herbier					
alg. vertes					
alg. brunes					
autres					
Corail					
corail G. B.					
corail P. B.					
corail massif					
millepora					
spongiaires					
alcyonaires					
autres					
Commentaire					



ANNEXE 3.8 - Classe C06 issue du modèle Ilot Maître et diagrammes sectoriels - Identification d'herbiers denses



ANNEXE 3.9 : Classe CO7 issue de du modèle Ilot Maître et diagrammes sectoriels - identification d'herbiers peu denses



ANNEXE 3.10 : Classe CO8 issue de du modèle Ilot Maître - identification d'herbiers clairsemés



ANNEXE 3.11 - Classe C10 issue du modèle Ilot Maître - identification des fonds sableux

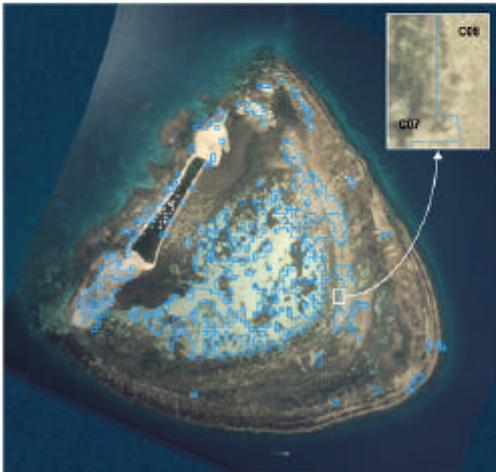
ANNEXE 3.12 - Les zones d'herbiers identifiées par le modèle Ilot Maître



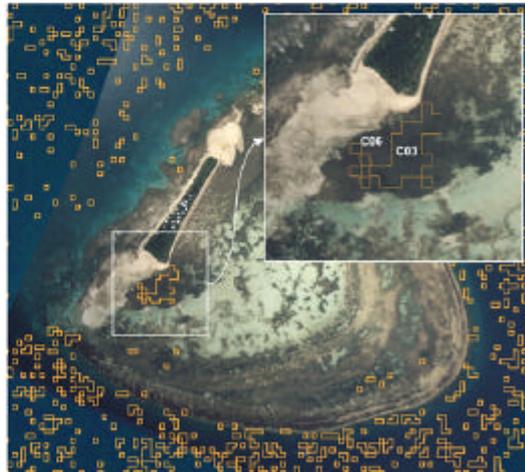
3.12a - Classe C06



3.12b - Classe C07



3.12c - Classe C08

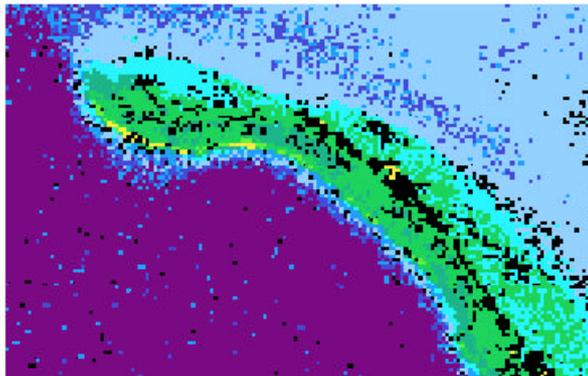


3.12d - Classe C10

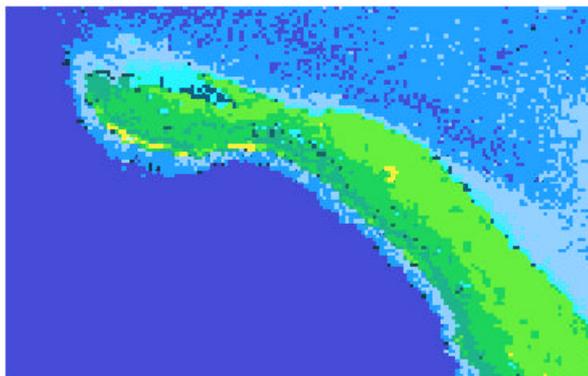
ANNEXE 3.14 - Classifications du Grand Récif Aboré



3.14a
Cliché Landsat 7

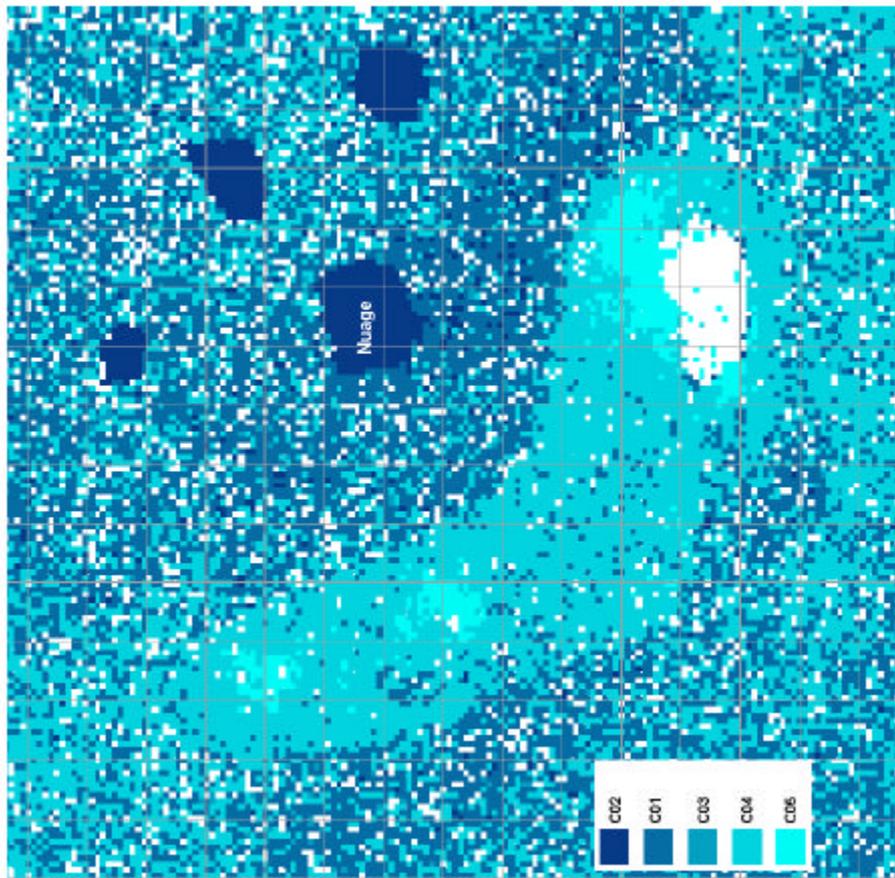


3.14b
Modèle Ilot Maître

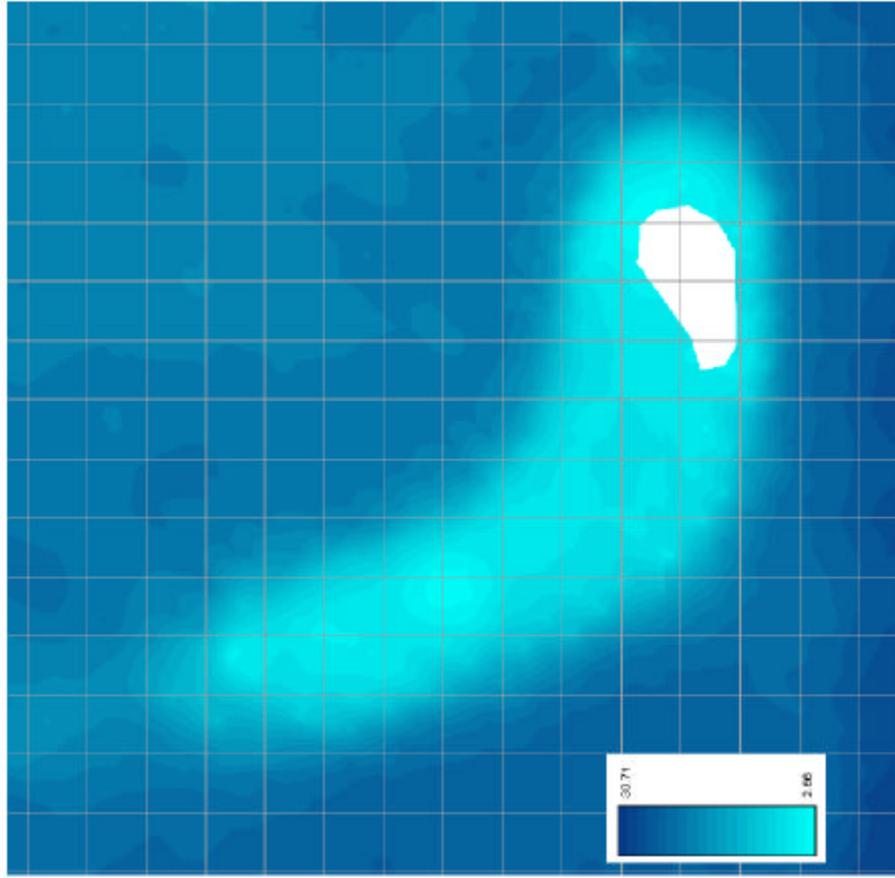


3.14c
Modèle global

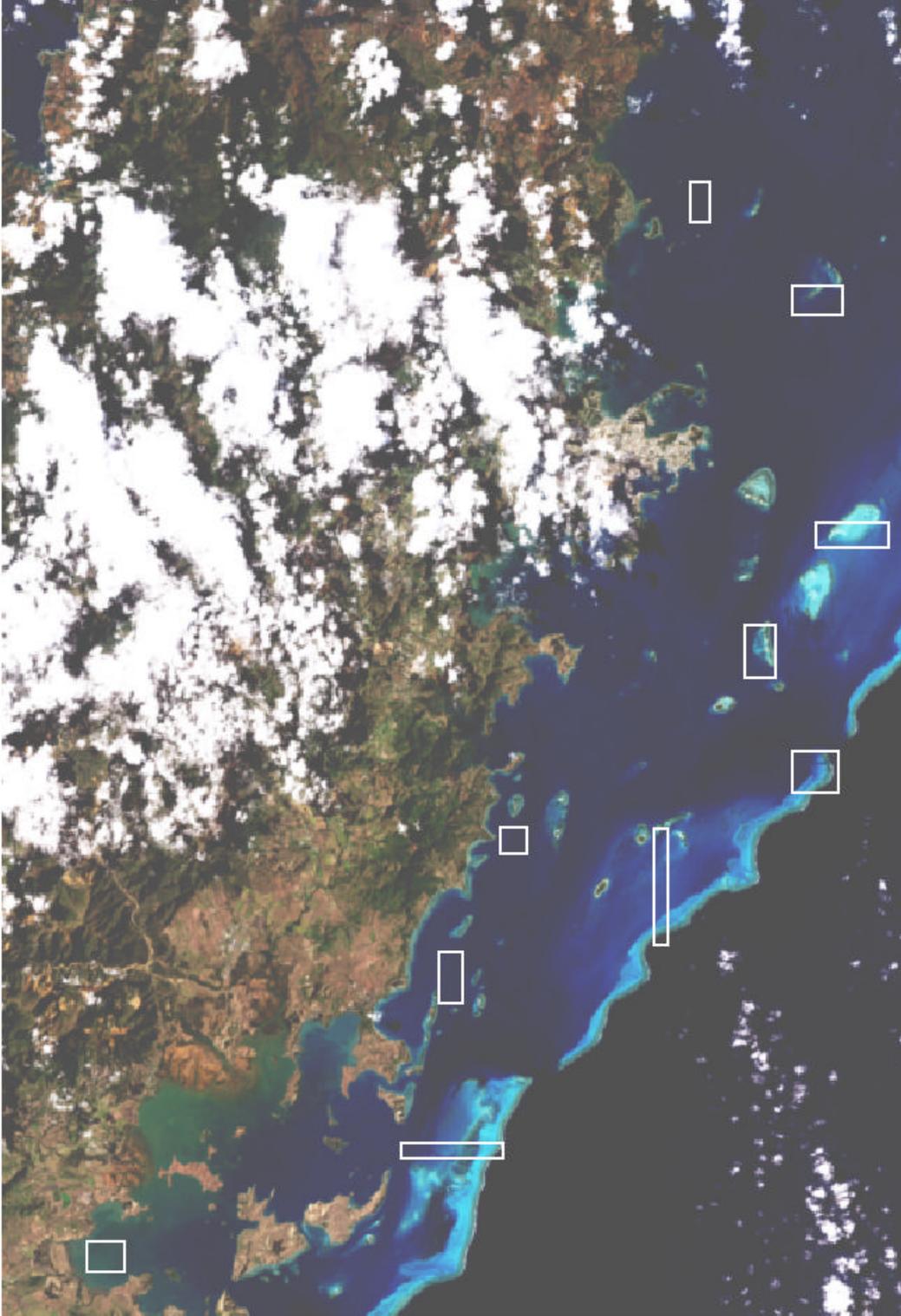
ANNEXE 3.15 - Classification des zones profondes sur le récif du Prony par le modèle Ilot Maître



Récif de Prony - 5 premières classes du modèle Ilot Maître

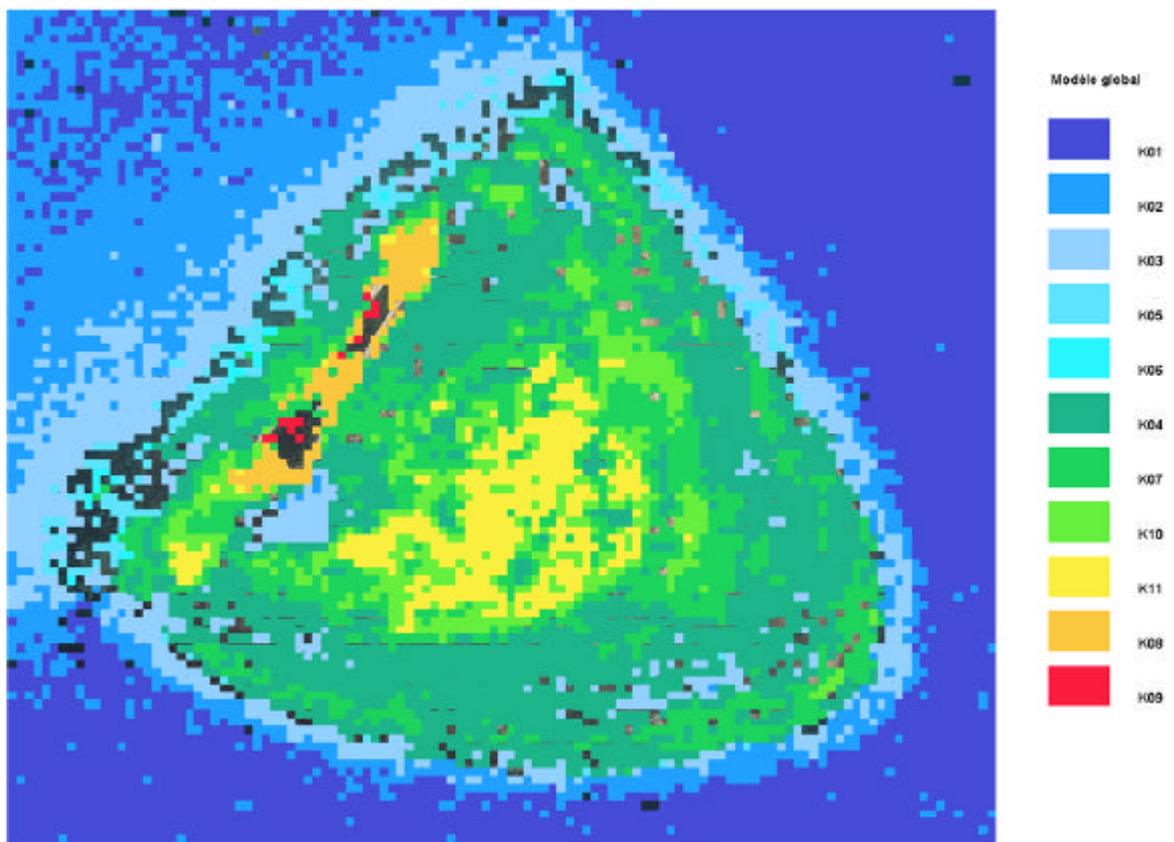
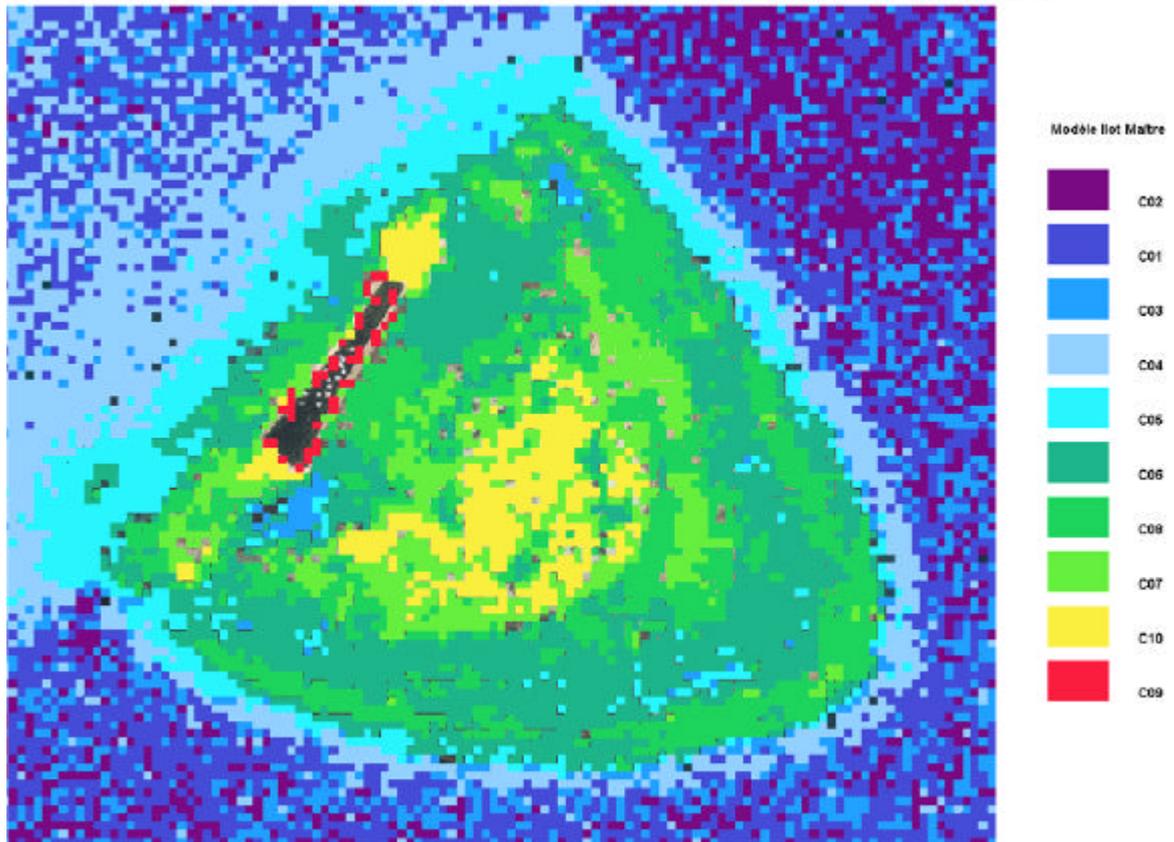


Récif du Prony - Interpolation bathymétrique - Profondeur en mètres



ANNEXE 3.16 - Zones échantillonnées pour construction du modèle global

ANNEXE 3.17 - Classifications de la zone Ilot Maître avec le modèle Ilot Maître et le modèle global





ANNEXE 3.18 - Herbiers très denses identifiés par le segment 11 issu de la segmentation par le modèle global

ANNEXE 3.20 - Règles de décision issues de l'application du modèle global sur les zones échantillonnées

	CLASSE 01	CLASSE 06	
Zones d'eaux profondes Maître : moyenne = 18 m. Min : 3 m Max : 25 m Aboré : moyenne = 50 m. Min : 8 m Max : 500 m	SEGMENT1 bande bleue >= 2 et bande bleue <= 82 bande verte >= 2 et bande verte <= 57 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 51 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 105 SEGMENT3 bande bleue >= 83 et bande bleue <= 87 bande verte >= 2 et bande verte <= 50 SEGMENT6 bande bleue >= 78 et bande bleue <= 249 bande verte >= 57 et bande verte <= 63 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 65	SEGMENT22 bande bleue >= 211 et bande bleue <= 249 bande verte >= 71 et bande verte <= 77 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 25 SEGMENT30 bande bleue >= 206 et bande bleue <= 125 bande verte >= 78 et bande verte <= 97 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 95 et bande PIR <= 249 SEGMENT27 bande bleue >= 202 et bande bleue <= 106 bande verte >= 84 et bande verte <= 97 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 29 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 15 SEGMENT26 bande bleue >= 97 et bande bleue <= 101 bande verte >= 91 et bande verte <= 97 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 29 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 15	Zones d'eaux de profondeurs intermédiaires Abore : moyenne = 12 m. Min : 5 m Max : 19 m
	CLASSE 02 SEGMENT4 bande bleue >= 83 et bande bleue <= 92 bande verte >= 51 et bande verte <= 57 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 53 SEGMENT8 bande bleue >= 78 et bande bleue <= 87 bande verte >= 57 et bande verte <= 63 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 135 SEGMENT9 bande bleue >= 2 et bande bleue <= 82 bande verte >= 64 et bande verte <= 70 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 55	CLASSE 07 SEGMENT35 bande bleue >= 202 et bande bleue <= 129 bande verte >= 98 et bande verte <= 131 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 95 et bande PIR <= 249 SEGMENT32 bande bleue >= 97 et bande bleue <= 101 bande verte >= 204 et bande verte <= 151 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 40 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 95	
Zones d'eaux de profondeurs intermédiaires Maître : moy : 13 m (8 ; 21) Aboré : moy : 19 m (14 ; 23) Maître : moy : 10 m (3 ; 21) Aboré : moy : 18 m (15 ; 21)	CLASSE 03 SEGMENT5 bande bleue >= 92 et bande bleue <= 249 bande verte >= 51 et bande verte <= 57 SEGMENT20 bande bleue >= 97 et bande bleue <= 101 bande verte >= 57 et bande verte <= 63 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 25 SEGMENT14 bande bleue >= 83 et bande bleue <= 87 bande verte >= 78 et bande verte <= 84 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 29 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 15 SEGMENT13 bande bleue >= 83 et bande bleue <= 87 bande verte >= 64 et bande verte <= 77 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 29 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 25 SEGMENT17 bande bleue >= 88 et bande bleue <= 96 bande verte >= 57 et bande verte <= 70 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 120 SEGMENT18 bande bleue >= 88 et bande bleue <= 92 bande verte >= 71 et bande verte <= 77 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 25 SEGMENT11 bande bleue >= 78 et bande bleue <= 82 bande verte >= 71 et bande verte <= 84 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 25	CLASSE 08 SEGMENT39 bande bleue >= 57 et bande bleue <= 249 bande jaune/rouge >= 74 et bande jaune/rouge <= 249 SEGMENT2 bande bleue >= 2 et bande bleue <= 82 bande verte >= 2 et bande verte <= 57 bande iaune/rouge >= 51 et bande iaune/rouge <= 249 SEGMENT7 bande bleue >= 2 et bande bleue <= 77 bande verte >= 57 et bande verte <= 63 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 95 et bande PIR <= 249 CLASSE 09 SEGMENT12 bande bleue >= 2 et bande bleue <= 82 bande verte >= 71 et bande verte <= 249 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 95 et bande PIR <= 249 SEGMENT16 bande bleue >= 83 et bande bleue <= 87 bande verte >= 64 et bande verte <= 249 bande jaune/rouge >= 30 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 95 et bande PIR <= 249 SEGMENT10 bande bleue >= 2 et bande bleue <= 82 bande verte >= 64 et bande verte <= 70 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 95 et bande PIR <= 255 SEGMENT29 bande bleue >= 88 et bande bleue <= 106 bande verte >= 78 et bande verte <= 97 bande jaune/rouge >= 30 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 95 et bande PIR <= 249 SEGMENT34 bande bleue >= 88 et bande bleue <= 101 bande verte >= 98 et bande verte <= 151 bande jaune/rouge >= 2 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 95 et bande PIR <= 249	Maître Zones d'herbiers peu dense Abore Zones coralliennes du récif pente interne Maître Sable très peu profond Zone émergées Aboré Vague
	CLASSE 04 SEGMENT15 bande bleue >= 83 et bande bleue <= 87 bande verte >= 78 et bande verte <= 249 bande jaune/rouge >= 30 et bande jaune/rouge <= 74 bande PIR >= 2 et bande PIR <= 95 SEGMENT28 bande bleue >= 88 et bande bleue <= 106 bande verte >= 78 et bande verte <= 97	CLASSE 10	
Tombant / pente externe			
Zones d'eaux de profondeurs intermédiaires Maître : moyenne = 10 m. Min : 3 m Max : 21 m Aboré : moyenne = 16 m. Min : 12 m Max : 20 m			
Arrière du récif (fond de lagon)			
Zones d'herbiers très denses			Zones émergées

RESUME

L'objectif de cette étude est la mise en place de méthodes d'utilisation d'images Landsat7 ETM+ couplée à un système d'information géographique (SIG) pour l'identification de biotopes par classification en milieu lagunaire. La méthode statistique créée utilise à la fois les méthodes de nuées dynamiques, ACP, classification ascendante hiérarchique et segmentation. Elle est appliquée sur les codes numériques issus des 4 premières bandes spectrales du satellite. La restitution du traitement des données se fait par SIG. Celui-ci permet de comparer les résultats de classification avec les données physiques et biologiques intégrées dans la base de données géographiques liées au SIG. Il ressort de l'application du modèle de classification une identification des fonds sableux, des herbiers (avec une distinction selon leur densité) et des zones coralliennes, le modèle restant peu discriminant pour des profondeurs supérieures à 3 m.

MOTS-CLES : Landsat7, classification, télédétection, SIG, milieu lagunaire.

ABSTRACT

The purpose of this work was to set up methodologies for using Landsat7 ETM+ images coupled with geographic information system (GIS) in lagoonal area. The statistical method created uses cloud seeding, PCA, up hierarchical clustering and segmentation. It was applied on the numerical counts of the satellite first 4 spectral bands. The treatment result is given on GIS and compared with physical and biological datas of the geographical database. This model allows the identification of the sand beds, sea grass and coral areas. But it is inoperant for depths bigger then 3 meters.

KEY-WORDS : Landsat7, clustering, remote sensing, GIS, lagoonal area.